



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

DIFERENCIÁLNÁ GPS

DIFFERENTIAL GPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DENIS LEBÓ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV ROZMAN, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce



Student: **Lebó Denis**
Program: Informační technologie
Název: **Diferenciální GPS**
Differential GPS

Kategorie: Umělá inteligence

Zadání:

1. Nastudujte technologii GNSS a konkrétně se zaměřte na lokalizaci pomocí diferenciální GPS.
2. Seznamte se s GPS přijímači Emlid Reach.
3. Nastudujte knihovny používané pro práci s GPS, vyberte vhodné pro akademické účely a zprovozněte je s poskytnutými GPS přijímači. Navrhněte program, který umožní číst data z GPS a zobrazovat pozici přijímače na mapy.cz
4. Navržený program vytvořte a otestujte přesnost lokalizace v různých módech - standardní GPS, DGPS se statickým přijímačem, DGPS s pohyblivým se přijímačem. Vyzkoušejte také různá umístění referenční GPS.

Literatura:

- Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, Chris G. Bartone: Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 3rd Edition, Wiley, ISBN978-1-119-54783-9
- Elliott Kaplan and Christopher J. Hegarty: Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd Edition, 2017, Artech House, ISBN-13: 978-1630810580

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- První tři body

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Rozman Jaroslav, Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 12. května 2021

Datum schválení: 11. listopadu 2020

Abstrakt

Účelom mojej bakalárskej práce je skúmanie technológie pre určenie lokácie – diferenčný globálny polohový systém (DGPS) so špecializáciou real-time kinematic (RTK). Jej využitie je určovanie pozície v real-time za pomoci dvoch blízkych GNSS prijímačov. Tieto prijímače, ktoré získavajú informácie o svojej polohe komunikáciou s GNSS satelitmi (technológia GNSS), spresňujú získanú polohu výmenou dát medzi sebou (nastavba technológie DGPS/RTK). Práca sa takisto zaoberá vizualizáciou získanej lokácie a umožnením komunikácie prijímačov GNSS pomocou internetu. V tejto práci je technológia DGPS umožňovaná pomocou dvoch GNSS prijímačov od firmy Emlid, konkrétne modelmi Reach Module. Problematika komunikácie GNSS prijímačov cez internet je riešená formou programu SNIP od firmy SubCarrier Systems, ktorý sprostredkováva túto komunikáciu, pričom vysielanie informácií pre korekciu prebieha pomocou protokolu NTRIP (sieťový prenos RTCM pomocou internetového protokolu). Pre tvorbu webovej stránky, slúžiacej na vizualizáciu získanej lokácie, bol zvolený webový framework Flask napísaný v programovacom jazyku Python. Pre vizualizáciu pozície na webovej stránke bola zvolená platforma Mapy.cz, za pomoci aplikateľného programu interfejsov poskytovného firmou Seznam.cz pre danú platformu – Mapy API.

Abstract

My thesis studies the navigational technology for determining the current location of an object – differential global navigational system (DGPS) with real-time kinematic (RTK) enhancement. The use of this technology is calculating the position of an object in real-time using two GNSS receivers. These receivers are used to acquire positional information from GNSS satellites (GNSS technology), which is then made more precise by the exchange of information between the receivers (DGPS/RTK technology). The thesis also provides a way to visualize the acquired location and provides a channel of communication for the GNSS receivers using the internet. The channel of communication will be provided by the program SNIP made by SubCarrier Systems. The correctional data from the GNSS receivers will be transmitted using the NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol) protocol. For the creation of the website the web application framework Flask, written in Python, was chosen. For the visualization of the acquired location the Mapy.cz platform with use of the application programming interface developed by Seznam.cz for this platform – Mapy API was chosen.

Klíčové slová

Diferenčná GPS, Emlid, Reach Module, RTK, real-time kinematic, NTRIP, SNIP, Mapy.cz, Mapy API, Flask, Python

Keywords

Differential GPS, Emlid, Reach Module, RTK, Real-Time Kinematic, NTRIP, SNIP, Mapy.cz, Mapy API, Flask, Python

Citácia

LEBÓ, Denis. *Diferenciálna GPS*. Brno, 2020. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Rozman, Ph.D.

Diferenciálna GPS

Prehlásenie

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pána Ing. Jaroslava Rozmana, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Denis Lebó
19. mája 2021

PodĎakovanie

Ďakujem môjmu vedúcemu Ing. Jaroslavovi Rozmanovi, Ph.D za jeho pomoc, čas a úsilie vynaložené, aby ma usmernil a naviedol k praktickému a zaujímavému výsledku. Pomocou tejto práce som sa dozvedel množstvo nových znalostí a nabral nové skúsenosti v predtým, mnou nepoznanou, časťou informačných technológií.

Obsah

1	Úvod	2
2	Technológia GNSS	4
2.1	Lokalizácia užívateľa pomocou pseudovzdialenosti	5
2.2	Globálny Navigačný Systém Družíc (GNSS)	8
2.3	Diferenciálna GPS	13
2.4	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol	16
3	Implementácia	20
3.1	Prehľad možností implementácie RTK korekcií	21
3.2	Implementácia NTRIP infraštruktúry	22
3.3	Webová aplikácia FITNav	27
4	Testovanie	34
4.1	Vplyv vzdialenosti	37
4.2	Porovnanie RTK vs. Standalone	42
4.3	Mobilný prijímač s RTK korekciami	44
5	Záver	46
	Literatúra	47

Kapitola 1

Úvod

Táto semestrálna práca sa primárne zameriava na navigáciu pomocou GPS a teda pre jednoznačnosť problémovej tematiky uvediem nasledujúci úryvok pre definíciu tohto výrazu. Úryvok je preložená citácia zo zdroja [15].

V terajšom inžinierskom použití presun z bodu A do bodu B je často rozdelený do troch spolúsúvisiacich kategórií:

- **Navigácia** odkazuje na určovanie momentálnej pozície objektu – zvyčajne nejakého vozidla, ktoré sa môže nachádzať vo vesmíre, vo vzduchu, na zemi, na alebo pod povrchom vody, alebo v podzemí. ...
... V moderných použitíach, body A a B môžu odkazovať na momentálny a cielený dynamický stav objektu, ktorý môže zahŕňať aj jeho rýchlosť, polohu alebo relatívnu polohu voči iným objektom. ...
- **Riadenie** sa vzťahuje na určovanie vhodnej trajektórie pre dosiahnutie žiadaného stavu pre objekt. ...
- **Kontrola** sa vzťahuje na určovanie akcií, ktoré sú potrebné pre dosiahnutie nasledovania požadovanej trajektórie pre riadený objekt

V moderných časoch je navigácia často umožnená pomocou technológie GNSS – globálny navigačný systém satelitov. Táto technológia spočíva v prijímaní informácií z umelých družíc v zemskom orbite a využitím týchto informácií aspoň zo štyroch rôznych družíc je možné odhadnúť pozíciu prijímača. Pre výpočet polohy sa používa vzdialenosť družíc od GNSS prijímača, ktorá je vypočítaná pomocou dĺžky času od vyslania signálu z družice po jeho prijatie. Následne pomocou matematického procesu nazývaným trilaterácia je vypočítaná teoreticky presná poloha objektu. Avšak v praxi družice, z ktorých sú informácie prijímané, sa nachádzajú v strednej obežnej dráhe Zeme s nadmorskou výškou medzi 19 000 - 24 000 kilometrov. Preto pri prenose signálu vznikajú rôzne oneskorenia, ktoré vo výsledku spôsobujú odchýlku pri výpočte vzdialenosti medzi družicou a prijímačom a zavádzajú chybu do odhadu pozície objektu. Presná veľkosť odchýlky závisí od množstva faktorov:

- používaný prijímač,
- využívaná konštelácia družíc,
- momentálna poloha, a pod.

Avšak v priebehu využívania tejto technológie, boli vyvinuté rôzne spôsoby pre zmenšenie tejto odchýlky . Medzi tieto metódy patrí aj tematika tejto semestrálnej práce – DGPS.

Podstatou metódy DGPS je použitie referenčného GPS prijímača pre korekciu chýb vo vypočítanej polohe, pričom pozícia tohoto prijímača je veľmi dobre známa. Dáta z tohto prijímača môžu byť odosielané v rôznych formách – signál z družice v geostaticonárnom orbite, rádiový signál z antény v okolí, cez internet, a pod.. Tieto dáta slúžia na korekciu chyby vytvorenej počas prenosu signálu z GPS družíc do nami používaného GPS prijímača. Najčastejší spôsob pre zavedenie DGPS je vypočítanie chyby spôsobenej pri prenose dát v referenčnom prijímači a vyslanie korekcie pre používaný GPS prijímač. [15]

Kapitola 2

Technológia GNSS

Ako bolo povedané v úvode, hlavná časť technológie GNSS je založená na družiciach GNSS konštelácii nachádzajúcich sa v strednej obežnej dráhe Zeme. Tieto konštelácie sú spravované rôznymi štátmi, prípadne ich zoskupeniami (Európska Únia). Momentálne sa v obežnej dráhe Zeme nachádzajú plne funkčné konštelácie:

- konštelácia GPS spravovaná Spojenými štátmi,
- konštelácia GLONASS spravovaná Ruskom,
- konštelácia Galileo spravovaná Európskou úniou,
- konštelácia BeiDou spravovaná Čínou.

Mimo konštelácii, ďalšou nezbytnou časťou tejto technológie je spôsob prevodu získaných dát na pozíciu prijímača. Dáta vysielané družicami obsahujú momentálny čas s vysokou presnosťou, ktorý je využívaný pre výpočet vzdialenosti medzi prijímačom a družicou. Najčastejší spôsob určovania momentálnej pozície prijímača je založený na jednoduchej rovnici:

$$d = c \cdot (t_r - t_s) \quad (2.1)$$

kde d značí pseudovzdialenosť prijímača od družice, c značí rýchlosť svetla vo vákuu, t_r značí čas, kedy bol signál prijatý prijímačom a t_s značí čas, kedy bol signál vyslaný z družice. Pre získanie pravej vzdialenosti prijímača z tejto rovnice, je potrebné zabezpečiť 2 veci: signál musí cestovať rýchlosťou svetla a t_r aj t_s musia byť extrémne presné časy. V praxi je ale takmer nemožné tieto ideálne podmienky zabezpečiť. Rýchlosť signálu v_s sa nerovná c , keďže je ovplyvňovaná rôznymi podmienkami, ako napríklad ionosféra Zeme, ktorá dokáže t_r a t_s ovplyvniť o 16 ns, čo môže chybné ovplyvniť polohu až o 5 m. Prechod troposférou pridáva ďalšiu chybu do rozdielu časov o veľkosti až 1.5 ns s výslednou odchýlkou polohy až 0.5 m [21]. Hlavný faktor chybovosti je nepresnosť hodín v prijímačoch, ktoré sa odchýlia v priemere asi o 32 sekúnd za dĺžku jedného roka. To znamená, že aj v prípade, keby hodiny boli nastavené sekundu pred príchodom signálu, chybovosť môže byť stovky metrov [34]. Jedinú podmienku, ktorú je možné splniť relatívne dobre, je presnosť hodín na družici. Tá je zabezpečovaná atómovými hodinkami na palube družice, ktoré dostávajú korekcie z pozemnej stanice v prípade variácie od času na Zemi. Variácia týchto hodín, najčastejšie rubídiových alebo vodíkových, je veľmi nízka – pre konšteláciu Galileo sa jedná o variáciu 1.8 ns za 12 hodín v rubídiových hodinách alebo 0.45 ns za 12 hodín vo vodíkových hodinách [11]. Chybovosť z vplyvu ionosféry a troposféry je možné redukovať technológiou DGPS, avšak najväčším problémom je nemožnosť zabezpečenia presnosti hodín v GPS prijímači v následku neprístupnosti a zložitosti technológie atómových hodín.

2.1 Lokalizácia užívateľa pomocou pseudovzdialenosti

Vysvetlenia v tejto kapitole sú inšpirované zdrojom [10]. Pričom vzorce sú priamo prevzaté z častí 1.9, 2.1, 2.2 [10]

Pri lokalizácii užívateľa je mimo výpočtu pozície nutné výpočítať aj veľkosť variácie užívateľských hodín od referenčného času konštelácie. Neschopnosť korekcie tohto faktoru by bola fatálna chyba vzhľadom na presnosť získanej pozície. Variáciu hodín je možné vypočítať za predpokladu, že chybovosť hodín je rovnaká pre všetky signály prijaté v rovnaký čas. Spočiatku je vyžadovaná zmena rovnice 2.1 na nasledovný tvar:

$$\frac{d}{c} + b_u = t_u - t_r \quad (2.2)$$

, kde t_u predstavuje čas zaznamenaný užívateľom ako čas príchodu signálu a b_u predstavuje neznámu variáciu času prijímača oproti pravému¹ času. Následne, keďže cieľom technológie GNSS je zistenie pozície objektu v 3D súradnicovom systéme, je potrebné vzdialenosť d vyjadriť ako euklidovskú vzdialenosť družice od prijímača:

$$\tau^{(N)} = \frac{\sqrt{(x_u - x^{(N)})^2 + (y_u - y^{(N)})^2 + (z_u - z^{(N)})^2}}{c} + b_u - B^{(N)} + \epsilon_u^{(N)} \quad (2.3)$$

, kde x_u, y_u, z_u , predstavujú neznáme hodnoty pozície prijímača pričom $x^{(N)}, y^{(N)}, z^{(N)}$ predstavujú pozíciu N -tej družice, kde $N \in \{1, 2, 3, \dots, \infty\}$. $B^{(N)}$ predstavuje odchýlku hodín družice od hlavného času konštelácie a finálne ϵ_s predstavuje všetky ostatné zdroje oneskorenia signálu. Výsledkom je $\tau^{(N)}$, predstavujúci rozdiel t_u a t_r pre družicu N .

V rovnici 2.3 vidíme presne štyri neznáme, ktorých hodnotu musíme vypočítať (x_u, y_u, z_u, b_u) a teda je možné povedať, že pre správnu funkčnosť GNSS lokalizácie, potrebujeme merania z aspoň štyroch rôznych družíc. Získaná funkcia nie je lineárna a preto ďalším krokom v lokalizácii užívateľa je jej linearizácia. Na obrázku 2.1 vidíme 1D zjednodušenie problému. Pre ďalšie zjednodušenie kalkulácií je potrebné vytvoriť istý predpoklad o pozícii prijímača, zastúpený premennou $x_{n,0}$. Ako bolo v kapitole 2 povedané, chyba je možná nielen v presnosti hodín prijímača, ale aj v informáciách prijatých od družice. Je teda potrebné počítat s chybou nielen v predpokladanej polohe prijímača, ale aj vo vysielanej polohe družice, znázornenej ako $x_B^{(k)}$. Na obrázku 2.1 je znázornená šípka z pravej polohy družice do pravej polohy lokalizovaného objektu $\tau_u^{(k)} = d_u^{(k)} + b_u$ a z vysielanej polohy satelitu do predpokladanej polohy objektu $|r_u^{k,B}| = d_A^{(k,B)}$. Takisto je možné predpokladať, že tieto dva vektory sú si navzájom rovnobežné v dôsledku vzdialenosti družice a pomerne malou chybovosťou medzi $x^{(k)}$ a $x_B^{(k)}$. Z toho vyplýva vzťah:

$$\tau_u^{(k)} - |r_u^{k,B}| = -\delta x_u \cdot \cos(el_u^{(k)}) + b_u \quad (2.4)$$

kde $|r_u^{k,B}|$ predstavuje dĺžku cesty signálu z vysielanej polohy družice do predpokladanej pozície prijímača. δx_u predstavuje veľkosť rozdielu medzi predpokladanou a pravou pozíciou a súčinom s $\cos(el_u^{(k)})$ dostaneme veľkosť príľahlej hrany uhlu el . Do pravej strany rovnice je však potrebné pridať súčet s variáciou užívateľských hodín b_u .

¹čas považovaný za hlavný čas konštelácie. Pre konšteláciu GPS synchronizovaný podľa hodín v U.S. Naval Observatory v Koloráde [28]

V tomto prípade nám zostanú 2 neznáme δx_u a b_u , ktoré môžeme vyriešiť dvoma rôznymi meraniami z dvoch rôznych družíc. Ďalším krokom v priblížení sa k reálnemu zavedeniu, je uvedenie satelitov mimo roviny, teda zavedenie uhlu az . Zatiaľ, čo el popisuje uhol medzi horizontovou rovinou a družicou, az popisuje uhol odklonu družice voči severu. Pre zohľadnenie týchto dvoch faktorov je potrebné rovnicu 2.4 upraviť na rovnice:

$$\begin{aligned}\tau_u^{(1)} - |r_u^{1,B}| &= -\delta x_u \cdot \cos(el_u^{(1)}) \cdot \sin(az^{(1)}) + b_u \\ \tau_u^{(2)} - |r_u^{2,B}| &= -\delta x_u \cdot \cos(el_u^{(2)}) \cdot \sin(az^{(2)}) + b_u\end{aligned}\quad (2.5)$$

Tieto rovnice sa vzťahujú na určovanie pozície družíc relatívne k polohe užívateľa. Teda x , y , z sú relatívne ku kartézskemu súradnicovému systému ENU², ktorého rovina je založená na dotyčnici k zemskému povrchu s miestom dotyku v polohe užívateľa, na rozdiel od typickej polohy určovanej relatívne k stredu, teda kartézskeho súradnicového systému ECEF³. Podobným postupom je možné určiť vzťah pre každú súradnicu, čoho výsledkom je nasledovná sústava rovníc:

$$\begin{bmatrix} \delta\tau_u^{(1)} \\ \delta\tau_u^{(2)} \\ \vdots \\ \delta\tau_u^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos el^{(1)} \sin az^{(1)} & -\cos el^{(1)} \cos az^{(1)} & -\sin el^{(1)} & 1 \\ -\cos el^{(2)} \sin az^{(2)} & -\cos el^{(2)} \cos az^{(2)} & -\sin el^{(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\cos el^{(K)} \sin az^{(K)} & -\cos el^{(K)} \cos az^{(K)} & -\sin el^{(K)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta E_u \\ \delta N_u \\ \delta U_u \\ \delta b_u \end{bmatrix}\quad (2.6)$$

V tejto sústave rovníc boli δx_u , δy_u , δz_u nahradné δE_u , δN_u , δU_u pre naznačenie orientácie v ENU súradnicovom systéme. Ďalej je sústava zjednodušená ako:

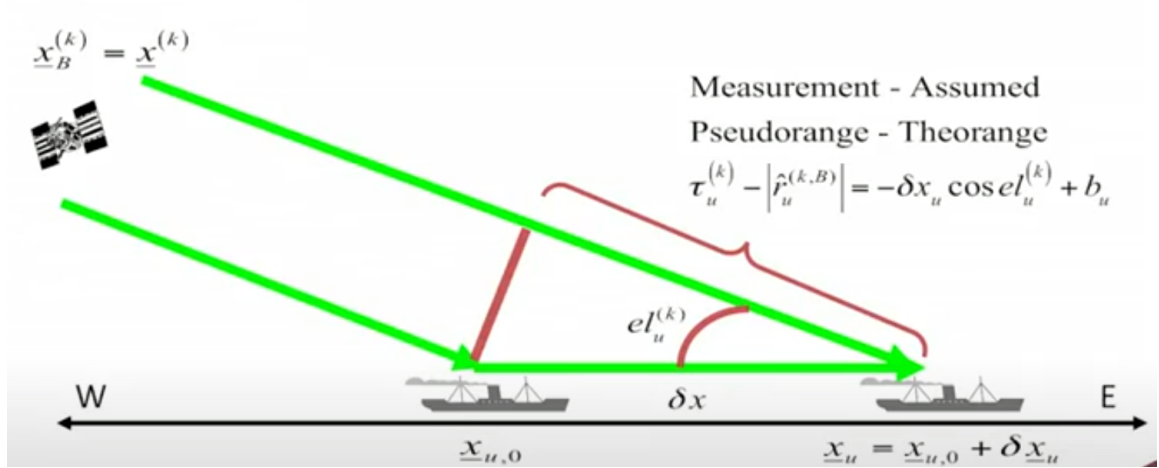
$$\begin{bmatrix} \delta\tau_u^{(1)} \\ \delta\tau_u^{(2)} \\ \vdots \\ \delta\tau_u^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{G}^{(1)} \\ \tilde{G}^{(2)} \\ \vdots \\ \tilde{G}^{(K)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta E_u \\ \delta N_u \\ \delta U_u \\ \delta b_u \end{bmatrix}\quad (2.7)$$

Matica \tilde{G} je široko používaná v celej oblasti GNSS pri určovaní polohy. Tilda naznačuje, že vypočítané súradnice sú v súradnicovom systéme ENU. Často používaná matica G predstavuje rovnakú maticu prevedenú do ECEF súradnicového systému. Pre dokončenie sústavy je pridaná reziduálna chyba z iných zdrojov, ako napríklad spomínaný vplyv ionosféry, troposféry, a pod.. Táto hodnota je predstavovaná premennou $\tilde{\nu}^{(k)}$. S finálnou sústavou rovníc:

$$\begin{bmatrix} \delta\tau_u^{(1)} \\ \delta\tau_u^{(2)} \\ \vdots \\ \delta\tau_u^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{G}^{(1)} \\ \tilde{G}^{(2)} \\ \vdots \\ \tilde{G}^{(K)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta E_u \\ \delta N_u \\ \delta U_u \\ \delta b_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{\nu}^{(1)} \\ \tilde{\nu}^{(2)} \\ \vdots \\ \tilde{\nu}^{(k)} \end{bmatrix}\quad (2.8)$$

²East-North-Up

³Earth-Centered, Earth-Fixed - [0,0,0] je v strede Zeme, osa X prechádza Greenwichským poludníkom, osa Z mieri na sever a osa Y je kolmá na X a Z a mieri na východnú pologuľu



Obr. 2.1: Vzťah medzi odhadovanou polohou a reálnou polohou

Obrázok je vyňatý z lekcie 2.1 [10]

Pre zjednodušenie zápisu je možné substitutovať vektory premennými $\delta \underline{x}_u$, $\tilde{\underline{\nu}}_u$, $\delta \underline{\tau}$, čím dostaneme rovnicu:

$$\delta \underline{\tau} = \tilde{G} \delta \underline{x}_u + \tilde{\underline{\nu}}_u \quad (2.9)$$

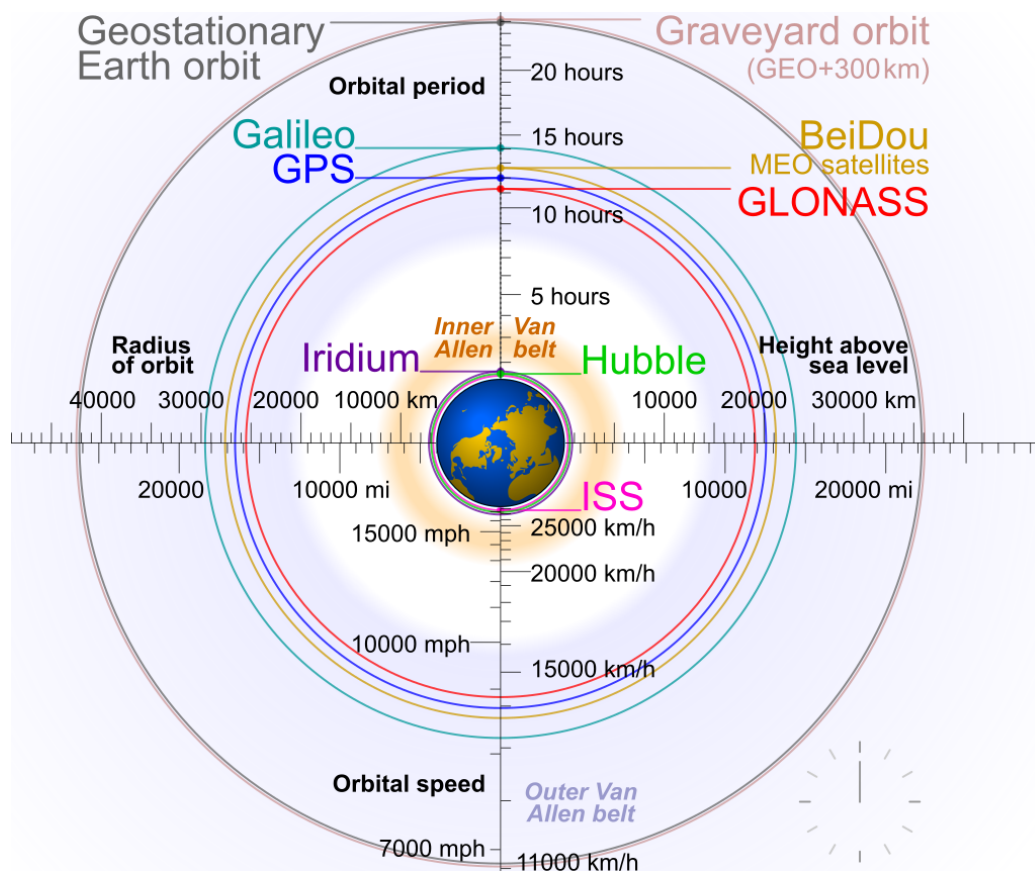
Posledným krokom v kalkulácii pozície je vypočítanie hodnôt vektoru $\delta \underline{x}_u$. Kalkulácia je veľmi jednoduchá v prípade, že existujú presne štyri merania, čím je získaná štvorcová matica \tilde{G} . V tomto prípade stačí celú rovnicu zľava násobiť maticou \tilde{G}^{-1} , čím dostaneme výsledok:

$$\delta \underline{x}_u = \tilde{G}^{-1} \delta \underline{\tau} - \tilde{G}^{-1} \tilde{\underline{\nu}}_u \quad (2.10)$$

V prípade, že počet meraní je viac ako štyri tento postup nie je aplikovateľný, pretože matica \tilde{G} nie je štvorcová a teda k nej neexistuje inverzná matica \tilde{G}^{-1} . Maticu \tilde{G} je ale možné upraviť tak, aby bol získaný čo najlepší odhad vektoru $\delta \underline{x}_u$ v takejto forme:

$$\delta \hat{\underline{x}}_u = (\tilde{G}^T \tilde{G})^{-1} \tilde{G}^T (\delta \underline{\tau} - \tilde{\underline{\nu}}_u) \quad (2.11)$$

2.2 Globálny Navigačný Systém Družíc (GNSS)



Obr. 2.2: Obrázok znázorňujúci orbity GNSS konštelácií s inými známymi orbitami [36]

Na to, aby bolo možné určovať polohu, je potrebná konštelácia družíc určených pre navigáciu. Skratka GNSS sa vzťahuje na obecné pomenovanie konštelácií, slúžiacich pre vysielanie signálu z vesmíru. Signál slúži na prenášanie pozičných a časových dát pre GNSS prijímače, tie následne využívajú prijaté dáta na určenie svojej polohy [6] ako je to vysvetlené v kapitole 2.1. Všeobecne sa tieto družice nachádzajú v strednom zemskom orbite vo výške 19 000 – 24 000 km ako je znázornené na obrázku 2.2. Dôvodom je nepriama úmera medzi silou signálu prijatého na Zemi a veľkosťou plochy zemského povrchu pokrytej jednou družicou. Teda, pokiaľ by sa konštelácia nachádzala v nízkom zemskom orbite, potrebovala by väčšie množstvo družíc na pokrytie rovnakej časti zemského povrchu, avšak signál by bol silnejší [17]. Naopak, pokiaľ by boli družice vo vysokom zemskom orbite, pre využitie signálu prijatého na Zemi by boli potrebné podstatne citlivejšie prijímače.

Momentálny trend v oblasti GNSS konštelácií je veľmi zaujímavý z dôvodu príchodu nových technológií a konštantným prírastkom nových družíc. Dokončenie hlavnej časti konštelácie Galileo, spravovanej ESA⁴ pod záštitou Európskej Únie, bez troch záložných družíc je plánované behom tohto roka, pričom plné dokončenie konštelácie je plánované na rok 2022 [33]. Konštelácia BeiDou, spravovaná CNSA⁵ pod záštitou Čínskej ľudovej republiky, dosiahla plnej veľkosti tridsiatich piatich satelitov 25. júna 2020.

⁴Európska kozmická agentúra

⁵Čínska národná vesmírna agentúra

GPS

Konštelácia, pôvodne zavedná pod názvom NAVSTAR GPS, sa skladá z 31 alebo viac aktívnych satelitov rovnomerne distribuovaných v 6 kruhových orbitoch s relatívnym uhlom k obežníku o veľkosti 55 stupňov [31]. Každý orbit je od seba oddelený o násobky 60-tich stupňov rektascenzie⁶. Polomer orbitu je 26 560 km s obežnou dĺžkou pol dňa siderického času (≈ 11.967 hodín). Konštelácia je postavená tak, aby vo väčšine miest na svete boli vždy prístupné aspoň 3 družice [15]. Každá družica obsahuje céziové alebo rubídiové atomické hodiny, pričom korekcie sú poskytované podľa hodín v U.S. Naval Observatory v Koloráde [28].

GPS Signály

Signály a spôsob vysielania signálov všetkých konštelácií zdieľajú podobnosti k originálnej GPS konštelácii. Pre ustanovovanie základov je teda užitočné podrobnejšie rozobrať signály vysielané všetkými družicami v konštelácii GPS a spôsoby ich propagácie.

Každá družica vysiela dva signály rozprestreté na spektre pásma L(1-2 GHz) – L_1 a L_2 , pričom $f_{L_1} = 1575.42$ MHz a $f_{L_2} = 1227.6$ MHz. Obe tieto frekvencie sú násobkami základnej frekvencie $f_0 = 1.023$ MHz. Signál L_1 používa binárne kľúčovanie fázovým posunom (BPSK) modulované dvomi pseudonáhodnými šumami (PRN) vo fázovej kvadratúre⁷. Používané PRN kódy sú P(Y) kód a C/A kód, obe vysvetlené nižšie. Signál L_2 takisto používa BPSK, avšak je modulovaný iba jedným PRN kódom - P(Y) kód. Pri metóde modulácie BPSK sú dáta zakódované do signálu ako zmena fázy signálu pri zmene logickej hodnoty zakódovávaného bitu. Dôvodom používania dvoch rôznych signálov s rôznymi frekvenciami je možnosť kalkulácie chybovosti spôsobovanej propagáciou signálu cez ionosféru. Keďže oba signály L_1 , L_2 boli vyslané v rovnaký čas a chyba spôsobená prechodom ionosférou je inverzne úmerná k veľkosti frekvencii signálu, je možné vypočítať chybu spôsobenú ionosférou pri použití dvojfrekvenčného prijímača.[15]

Všetky družice vysielajú na rovnakých frekvenciách a pre rozlíšenie signálu pochádzajúceho práve z konkrétnej družice sa používa technológia kódového multiplexingu (CDMA). Signály konkrétnej GPS družice sú rozlišované práve vďaka PRN kódom, ktoré sú unikátne pre každú družicu. Tieto kódy sú známe pre všetky prijímače a pomocou korelácie daného PRN kódu, poprípade kódov, je možné identifikovať danú družicu. Unikátnosť a známosť týchto kódov slúži aj ďalšej veľmi podstatnej funkcii. V kapitole 2.1, bol odvodený vzorec 2.11, ktorý pre vypočítanie pozície užívateľa, predpokladal znalosť $\delta\tau$, teda dĺžka času od vyslania signálu po jeho prijatie, avšak spôsob zistenia hodnoty $\delta\tau$ nebol určený. Táto funkcionálna je zabezpečovaná vďaka PRN kódom. Keďže hodnota PRN kódu je v každom momente známa pre prijímač, je možné určiť o koľko čipov PRN kódu je prijatý signál odlišný od očakávanej hodnoty PRN kódu. Príklad pre ilustráciu:

Obdržaný PRN kód v čase t : 945216892...

Očakávaný PRN kód v čase t : 5216892...

⁶rektascenzia je uhol medzi rovinou deklinácie kružnice a rovinou deklinácie kružnice prechádzajúcou bodom rovnodennosti

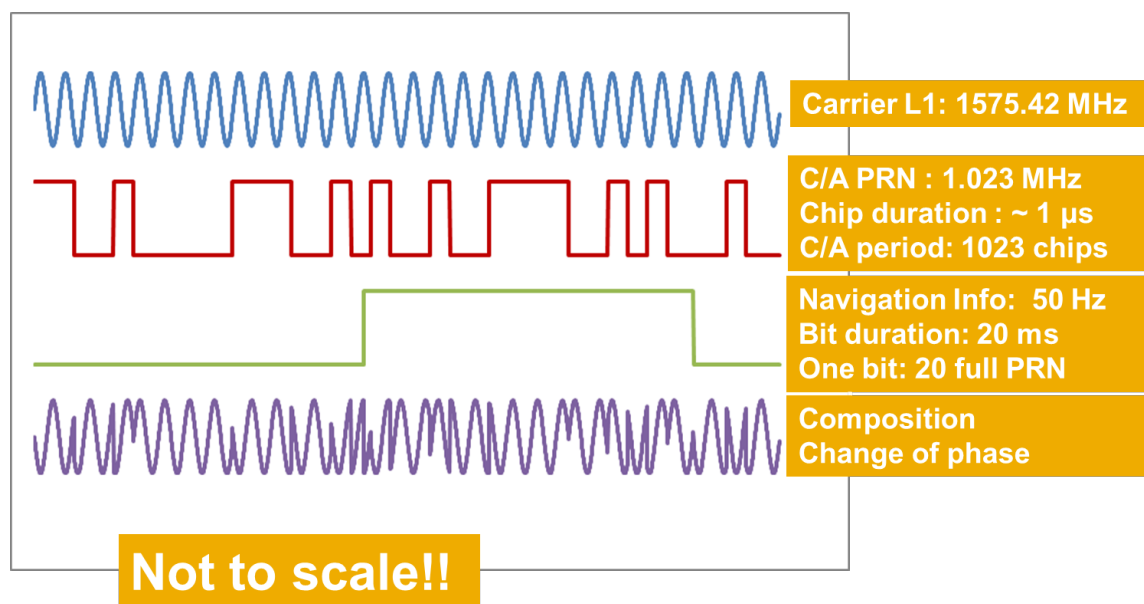
⁷posunuté relatívne voči druhému o 90°

V tomto prípade vidíme, že od vyslania signálu po jeho prijatie prešli 2 čipy PRN kódu a pokiaľ vieme čipovaciu frekvenciu daného PRN kódu, je možné zistiť dĺžku času cesty signálu. Pre splnenie tejto funkcie musí byť hodnota očakávaného PRN kódu jednoznačná a takisto musí byť jasne určiteľné o koľko musí byť PRN kód posunutý, aby došlo k zhode očakávaného a obdržaného kódu. Teda korelačný koeficient navrhnutého kódu musí byť veľmi nízky v nesprávnej pozícii a veľmi vysoký v správnej. Napriek názvu pseudo-náhodné kódy, sú tieto kódy navrhnuté veľmi precízne pre splňovanie daných požiadavkov. Ich názov pochádza z faktu, že osamostatnené kódy nenesú žiadny význam.

P(Y) kód - nazývaný *Precision code* je relatívne dlhý kód s čipovacou frekvenciou $f_P = 10 \cdot f_0 = 10.23 \text{ MHz}$, ktorého prenos pri frekvencii f_P trval 259 dní. Každá družica prenáša iba určitú unikátnu časť celého kódu s periódou siedmich dní. P kód má možnosť zašifrovania pomocou operácie XOR s W kódom, prístupným iba pre armádne zložky – v tomto prípade sa nazýva Y kód.

C/A kód - nazývaný *Coarse Acquisition code* je kratší kód s čipovacou frekvenciou $f_{C/A} = f_0 = 1.023 \text{ MHz}$ o dĺžke 1023 čipov a teda s periódou 1 ms. Tento kód je unikátny pre každú družicu. Výhodou C/A kódu je možnosť pomerne rýchlej korelácie vďaka podstatne kratšej perióde, a teda je používaný na získanie počiatočných navigačných dát družice. Po získaní počiatočných dát sa prijímač prepne na zameranie robustnejšieho P kódu pre zlepšenie získaných efimeríd⁸ družice. Do oboch PRN kódov sú zakódované navigačné dáta s rýchlosťou 50 bitov za sekundu, obsahujúce efemeridy družice, informácie ohľadom časovej výchylky satelitných hodín a informácie o celej konštelácii. [15]

Nové signály pre civilné použitie sú L1C, L2C a L5, avšak tieto signály zatiaľ nie sú podporované dostatočným množstvom družíc, aby mohli byť považované za plne zavedné signály.



Obr. 2.3: Ukážka zložiek L1 signálu[27]

⁸údaje o polohe astronomických objektov

GLONASS

Plným názvom *Global Orbiting Navigation Satellite System*, pôvodne zavedný ministerstvom obrany Sovietskeho zväzu v roku 1970 s prvou testovacou družicou v roku 1982. Konštelácia sa nachádza vo výške $h = 19000$ km s polomerom $r = 25510$ km, je zložená z dvadsiatich štyroch družíc v troch orbitných rovinách s uhlom relatívne k obežníku 62.8° . Roviny sú od seba oddelené o 120° rektascenzie.

Na rozdiel od GPS, signály GLONASS používajú frekvenčnú moduláciu (FDMA), teda každá družica vysiela na inej frekvencii. GLONASS prenáša 2 signály zhruba zodpovedajúce funkcionalite L_1 a L_2 s frekvenciami $f_1 = (1.602 + 9k/16)$ GHz a $f_2 = (1.246 + 7k/16)$ GHz pričom $k = \{-7, -6, -5, \dots, 5, 6\}$ značí číslo satelitu. Tieto signály sú rozprestreté na pásmach $L_1 = 1.598 - 1.605$ GHz a $L_2 = 1.242 - 1.248$ GHz. GLONASS používa PRN kódy ST, zhruba zodpovedajúce C/A kódu, a VT, zhruba zodpovedajúce P kódu. Periódy opakovania, čipovacie frekvencie sú odlišné od C/A kódu a P kódu, pričom ST a VT kódy sú narozdiel od GPS satelitov pre všetky družice rovnaké.[15]

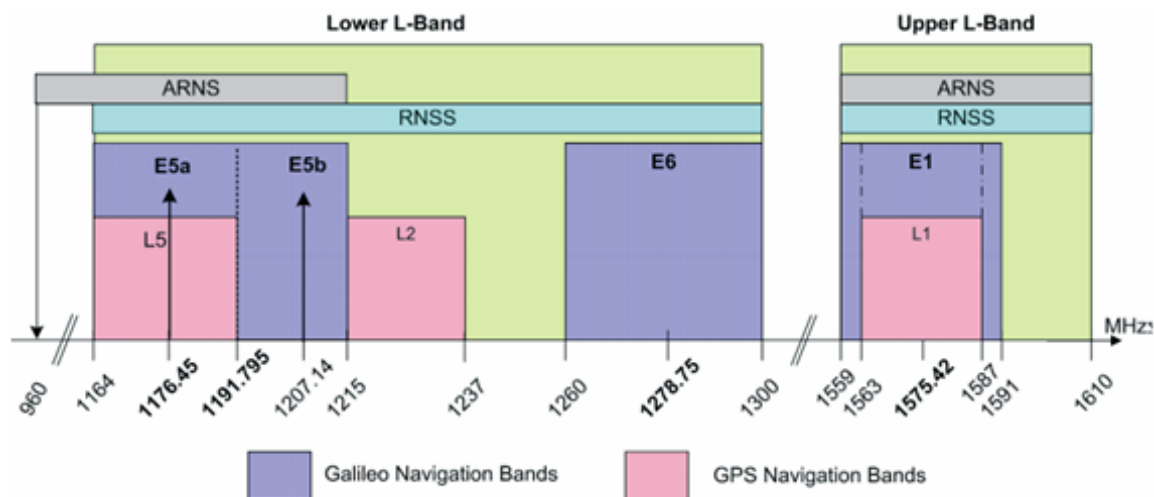
Nové generácie GLONASS družíc K1 sú vyvinuté pre používanie CDMA zároveň so staršími FDMA signálmi s novou CDMA frekvenciou $f_{L_3} = 1202.025$ MHz.[16]

Galileo

Galileo je najnovšia konštelácia mimo IRNSS⁹ s prvou družicou zavedenou do operácie v roku 2010. Konštelácia sa nachádza vo výške 23 222 km s polomerom orbitu 29 994 km a obežnou periódou 14.01 h. Skladá sa z 27 družíc rovnomerne rozložených v troch rovinách, pričom každá rovina obsahuje jednu záložnú družicu s finálnou veľkosťou 30 družíc. Dosiahnutie plného počtu družíc sa plánuje na rok 2022 [33]. Galileo poskytuje 10 rôznych signálov, pričom tieto signály poskytujú 4 hlavné služby:

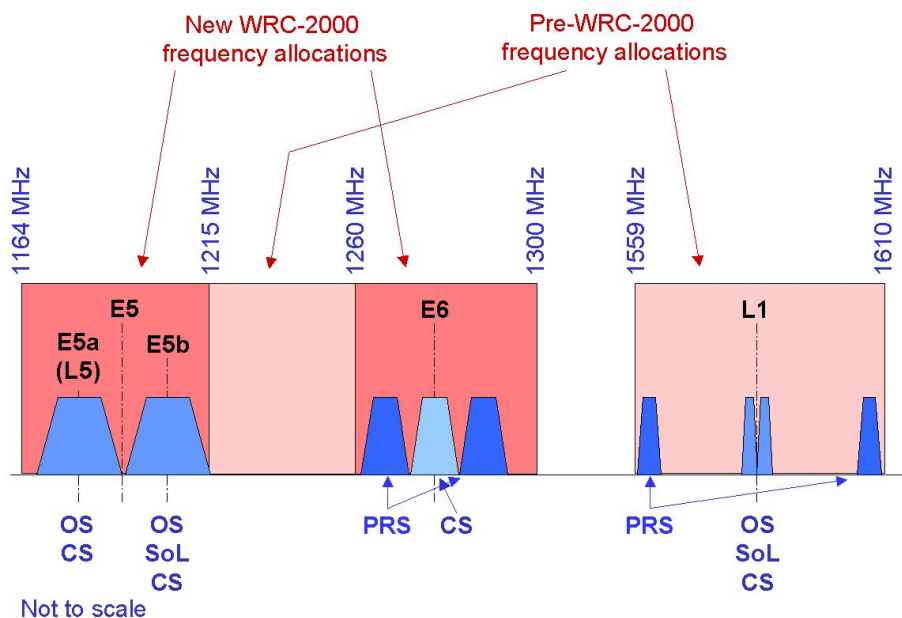
- Open Service (OS) - verejná polohovacia služba podobná L_1 a L_2 signálom
- Safety-of-Life (SoL) - služba poskytujúca lokalizáciu a prijímanie núdzových signálov
- Commercial Service (CS) - vysokoprestnostná služba pre komerčných zákazníkov
- Public Regulated Service (PRS) - lokalizačná služba určená pre štátne organizácie

⁹Indian Regional Navigation Satellite System

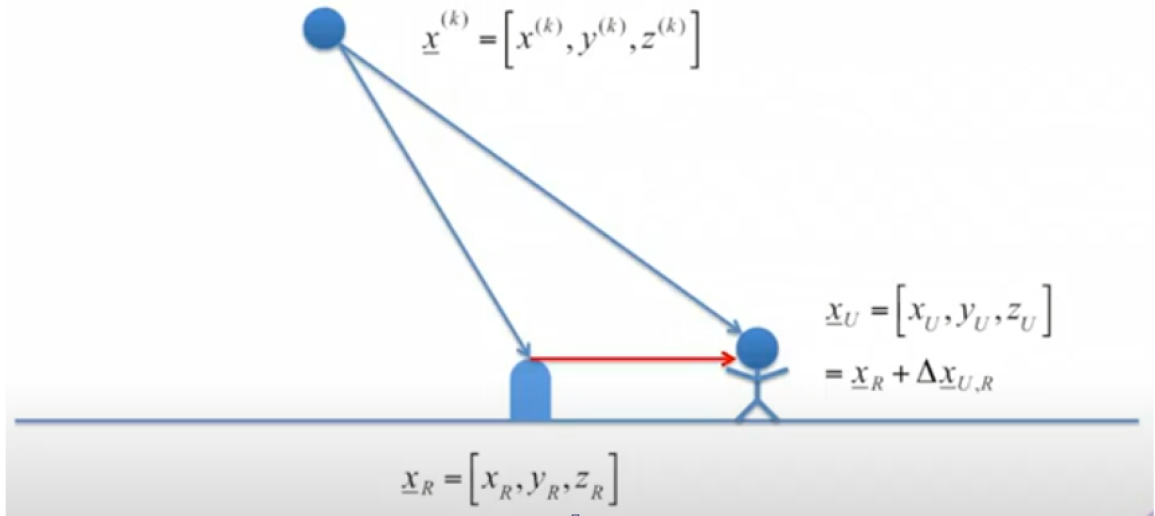


Obr. 2.4: Rozloženie frekvencií signálov Galileo[23]

Podstatným rozdielom Galileo od GPS a GLONASS je sprístupnenie vyskopresnostného režimu pre komerčné účely, na rozdiel od obmedzenia iba pre armádne účely. Signály Galileo používajú množstvo technologických vylepšení oproti pôvodným GPS družiciam. Podstatným rozdielom je zavedenie pilotného kanálu do signálu. Tento kanál nenesie žiadne dáta, avšak je jednoduchší na zameranie, teda dokáže pomôcť pri zameriavaní dátového kanálu, predovšetkým v miestach s nízkym signálom. Koncept bol pôvodne zavedený na signále L_5 v konštelácii GPS, no vďaka novosti konštelácie Galileo bolo možné túto technológiu a mnoho iných modernizácií GNSS zaviesť do celej konštelácie.



Obr. 2.5: Popis služieb poskytovaných na jednotlivých frekvenciách[12]



Obr. 2.6: Vizualizácia základného princípu DGPS[10]

2.3 Diferenciálna GPS

Diferenciálna GPS, prípadne nazývaná diferenciálna GNSS je metóda pre spresňovanie pozície získanej pomocou GNSS technológie. Toto spresňovanie spočíva v použití sekundárneho referenčného prijímača, ktorého pozícia je veľmi dobre známa a relatívne k povrchu Zeme nemenná. Najčastejšie používaná forma DGPS je založená na určovaní chyby pochádzajúcej z chyby v efemeride získanej z navigačnej správy (v prípade, že družica je jemne odklonená od jej obežnej dráhy) a určovaní chyby pochádzajúcej z odchýlky satelitných hodín – táto chyba zahŕňa aj chybu z propagácie signálu. Tieto výpočty prebiehajú a sú zasielané užívateľskému prijímaču v reálnom čase. Následne prijímač upraví svoje merania na základe obdržaných korekcií z referenčného prijímača. [15]

Pre znázornenie konkrétnych chybových hodnôt, ktoré sú pomocou technológie DGPS odstraňované, je potrebné rozpísať premennú $\tilde{\nu}^{(k)}$, do ktorej boli zahrnuté všetky predpoklady reziduálnej chybovosti z kapitoly 2.1. Vyjadrenie linerizovanej rovnice pre výpočet rozdielu času príchodu signálu a času vyslania signálu so súradnicami užívateľa v referenčnom rámci Earth-Centered Earth-Fixed(ECEF) je možné napísať ako [10]:

$$\delta\tau^{(k)} = -\Delta\underline{x}_{U,R} \bullet \underline{l}_U^{(k)} + \delta\underline{x}^{(k)} \bullet \underline{l}_U^{(k)} + \delta b_U - \delta B^{(k)} + \delta I + \delta T + \nu \quad (2.12)$$

pričom $\Delta\underline{x}_{U,R}$ predstavuje vektor medzi referenčným prijímačom a užívateľským prijímačom, teda podobné k δx z obrázku 2.1 pri štandardnom zavedení GNSS, zatiaľ čo $\bullet \underline{l}_U^{(k)}$ reprezentuje prevedenie súradníc do súradnicovej sústavy ECEF. $\delta\underline{x}^{(k)}$ predstavuje chybu v pozícii k-tého satelitu voči pozícii, ktorá bola vyčítaná z navigačných dát. δb_U predstavuje odchýlku užívateľských hodín a $\delta B^{(k)}$ predstavuje odchýlku hodín k-tého satelitu. δI a δT predstavujú chybu spôsobenú prechodom ionosférou a troposférou respektívne. Zvyšné chybové zdroje sú zhrnuté do premennej ν . Je užitočné vedieť, že primárnym zdrojom týchto chýb je multipath propagácia – situácia, kedy má signál viac ako 1 cestu k prijímaču, napríklad pri odraze od okolitých objektov.[10]

Pri použití dvoch rôznych prijímačov je možné zistiť rozdiel τ_U a τ_R , teda τ namerané u užívateľa a u referenčného prijímača. Pomocou tejto znalosti je možné zostrojiť rovnice:

$$\tau_U^{(k)} = |\underline{x}^k - \underline{x}_U| + I_U + T_U + b_U - B^{(k)} + \nu_U \quad (2.13)$$

$$\tau_R^{(k)} = |\underline{x}^k - \underline{x}_R| + I_R + T_R + b_R - B^{(k)} + \nu_R \quad (2.14)$$

$$\tau_U^{(k)} - \tau_R^{(k)} = |\underline{x}^k - \underline{x}_U| - |\underline{x}^k - \underline{x}_R| + \Delta I + \Delta T + b_u - b_R + \nu_U - \nu_R \quad (2.15)$$

, kde $|\underline{x}^k - \underline{x}_{U/R}|$ predstavuje dĺžku vzdialenosti medzi satelitom a prijímačom, ΔI a ΔT sú rozdiely chýb z ionosféry a troposféry medzi užívateľským a referenčným prijímačom. Predpoklad je, že tieto rozdiely sa budú rovnať približne 0, alebo budú aspoň zanedbateľne malé. Keďže v rovnici 2.12 bolo určené, že $-\Delta \underline{x}_{U,R} \bullet l_U^{(k)}$ sa rovná δx^k , teda je možné povedať, že veľkosť rozdielu medzi vektormi vzdialenosti referenčného a užívateľského prijímača je rovná $-\Delta \underline{x}_{U,R} \bullet l_U^{(k)}$. Po dosadení do rovnice 2.15 dostaneme:

$$\tau_U^{(k)} - \tau_R^{(k)} = -\Delta \underline{x}_{U,R} \bullet l_U^{(k)} + \Delta I + \Delta T + \Delta b_{U,R} + \Delta \nu_{U,R} \quad (2.16)$$

Pričom $-\Delta \underline{x}_{U,R} \bullet l_U^{(k)}$ je ekvivaletné $G\delta \underline{x}_u$ ¹⁰ so súradnicami v súradnicovom priestore ECEF. Teda celkový zápis pre merania vyzerá nasledovne:

$$\begin{bmatrix} \tau_U^{(1)} - \tau_R^{(1)} \\ \vdots \\ \tau_U^{(k)} - \tau_R^{(k)} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} \delta x_{U,R} \\ \delta y_{U,R} \\ \delta z_{U,R} \\ \delta b_{U,R} \end{bmatrix} + \Delta I + \Delta T + \Delta \nu_{U,R} \quad (2.17)$$

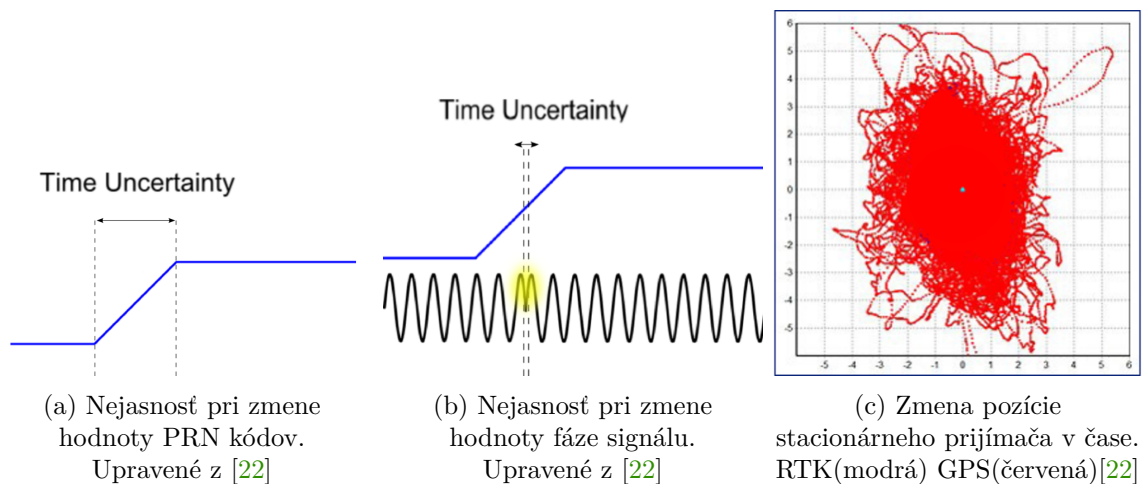
Pri používaní DGPS je výsledkom výpočtov relatívna vzdialenosť od referenčného prijímača, narozdiel od odhadovanej pozície ako je to pri štandardnom zavedení. Týmto zavedením sa podarilo eliminovať chyby spôsobené odchýlkou v efemeride, hodinách družice, takisto ako aj chyby zapríčinené prechodom ionosférou a troposférou. Avšak je nutné si uvedomiť, že týmto procesom bola zvýšená chybovosť označovaná ν , spôsobovaná multipath propagáciou. Je vysoko nepravdepodobné, že oba prijímače budú zaznamenávať rovnakú chybu ν , keďže zdrojom tejto chybovosti je odraz signálu z okolitých objektov, teda je závislý od okolia. V praxi sa informácie získané pomocou DPGS metód predávajú v rôznych formátoch, pričom najpopulárnejšími sú RINEX a RTCM. Z tohto dôvodu sa korekčné dáta často nazývajú aj RTCM alebo RINEX dátami.

¹⁰Matica G je ekvivalentná k matici \tilde{G} z rovnice 2.7 prevedenej do ECEF

RTK

Plným názvom *Real Time Kinematic* je technológia založená na princípe podobnom DGPS. Pre spresnenie polohy sú používané dva prijímače, jeden stacionárny a jeden mobilný. Pre korekciu polohy je zisťovaný rozdiel polohy referenčnej stanice a užívateľského prijímača. Tieto korekcie sú následne započítané do kalkulácie pozície získanej pomocou bežnej GNSS lokalizácie, pre získanie podstatne presnejšej pozície.

Podstatný limitujúci faktor v presnosti DGPS technológie je samotná frekvencia PRN kódov. Pokiaľ isté zavedenie vyžaduje presnosť v ráde centimetrov, táto požiadavka nie je splniteľná za používania iba PRN kódov pre meranie vzdialenosti. Maximálna možná presnosť týchto meraní je limitovaná na 0.5 m. Pri presnosti ≈ 1 cm, je potrebné poznať presnú dĺžku cesty signálu s presnosťou $3 \cdot 10^{-11}$ s. Pri PRN kódoch, ako vidieť na obrázku 2.7a, je takmer nemožné určiť presne, kedy bol daný kód vyslaný, pretože čipovacia frekvencia je príliš nízka pre tieto účely. Problém znázorňovaný na obrázku 2.7a je neschopnosť určiť, kedy presne nastala zmena PRN kódu z logickej 0 na logickú 1 počas stúpajúcej hrany signálu. Tento problém je riešený technológiou RTK, ktorá umožňuje čítať zmeny fázy nosného signálu, z ktorej je jednoznačné, kedy bola hodnota signálu zmenená ako je znázornené na obrázku 2.7b. Presnejšie odčítanie je umožnené podstatne vyššou frekvenciou nosného signálu – $f_{C/A} = 1.023$ MHz $f_{L1} = 1575.42$ MHz viditeľné na obrázku 2.3. [22]



Toto zavedenie prináša problém, a to nutnosť poznať presný počet celých cyklov počas cesty signálu. Táto požiadavka je prítomná aj pri odčítaní vzdialenosti z PRN kódov, ale nepredstavovala vážny problém. PRN kódy boli špeciálne navrhnuté práve tak, aby táto požiadavka bola jasne a jednoducho splniteľná. Pri získaní vzdialenosti z fázy nosného signálu je táto podmienka ťažšia na splnenie, pretože nie je možné okamžite určiť, ktorá zmena fázy prebehla presne v momente vyslania signálu. Táto hodnota je pre danú družicu nemenná, teda cieľom je túto neznámu, nazývanú *integer ambiguity*, čo najrýchlejšie zistiť a udržať spojenie s danou družicou čo najdlhšie. Vyriešenie problému integer ambiguity nie je avšak nutne možné v každej situácii. Podmienky v ktorých sa prijímače nachádzajú, vzdialenosť od referenčného prijímača, počet viditeľných satelitov, počet spracovávaných signálov, atp. tieto faktory podstatne ovplyvňujú možnosť, alebo dĺžku času potrebnú pre vyriešenie integer ambiguity. Podľa odporúčaní firmy Emlid sú jednopásmové prijímače, ako ten používaný v tejto práci, limitované na vzdialenosť 10km od referenčného prijímača.

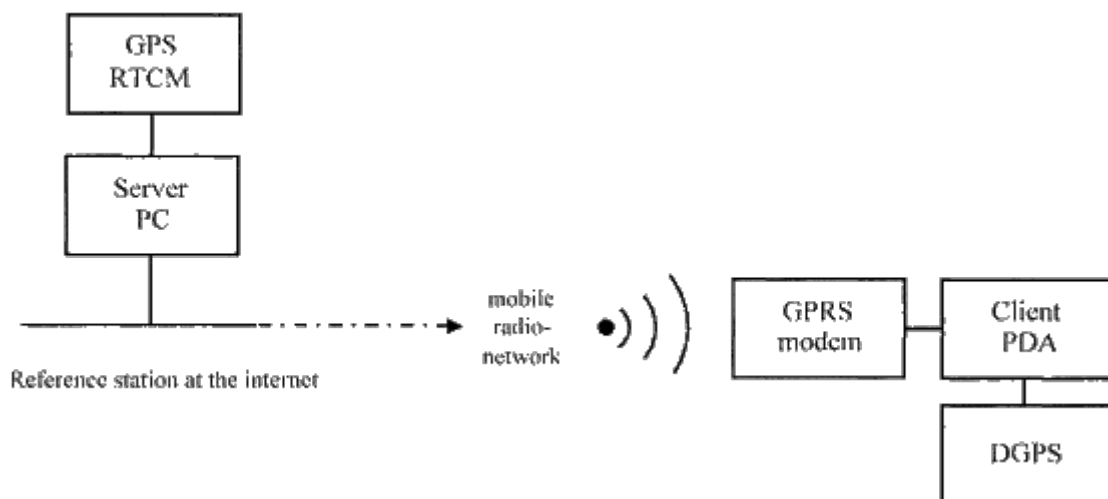
Najprv je možné zmenšiť počet prípustných riešení integer ambiguity pomocou bežných DGPS/GNSS meraní. Následne postupom času a získaním viacerých meraní z rovnakej družice, je možné rôznymi štatickými metódami túto hodnotu postupne spresniť. Rýchlosť vyriešenia tejto neznámej je závislá od 4 faktorov:

- počtu viditeľných družíc,
- či je prijímač jedno alebo dvojfrekvenčný,
- veľkosť chyby spôsobovanej dôsledkom multipath propagácie,
- charakteristiky antény pri mitigácii chyby spôsobovanej multipath propagáciou.

2.4 Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

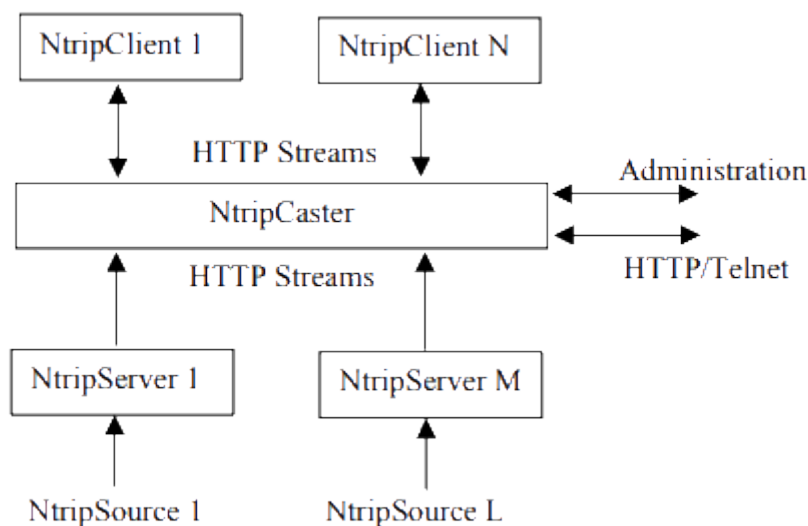
Najprístupnejšou formou komunikácie pre množstvo GNSS systémov s využitím RTK korekcií je internet. Pre túto funkcionality bol vyvinutý protokol NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Počiatočná verzia tohoto protokolu (verzia 1.0) bola vyvinutá nemeckou Národnou Agentúrou pre Kartografiu a Geodéziu (BKG) v spolupráci s Technickou Univerzitou v Dortmunde. Protokol bol navrhnutý ako generický a bezstavový protokol založený na báze protokolu HTTP/1.1. Verzia 1.0 bola pôvodne navrhnutá ako open standard, avšak bola ďalej upravená a štandardizovaná organizáciou RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) v roku 2009 s ďalšími verziami v rokoch 2011 a 2020. Špecifikácie nových verzii 2.0 a 3.0 sú v momentálnej dobe prístupné iba za poplatok, takže nie je presne známe ako tieto verzie protokolu fungujú. V tejto kapitole budú ďalej preberané iba vlastnosti protokolu známe z verzie 1.0. Je možné povedať, že hlavné princípy zostali nezmenené, keďže novšie verzie sú plne spätne kompatibilné s verziou 1.0 [3].

Pre odovzdania korekčných dát využitím NTRIP existujú dva spôsoby: priamou komunikáciou s jednou referenčnou stanicou alebo agregovaním všetkých dát z viacerých referenčných staníc v jednej sieti na centrálny server kde môžu byť upravené pred ich odoslaním.



Obr. 2.8: Tok RTCM dát zo stacionárneho prijímača k užívateľskému prijímaču [32]

Na obrázku 2.8 je znázornené možné zavedenie RTK systému. Stacionárny prijímač odovzdá korekčné dáta v RTCM formáte k pripojenému užívateľskému zariadeniu s internetovým pripojením, ktoré následne odošle tieto dáta pripojeným užívateľom. V prípade, že internetové pripojenie nie je potrebné, napríklad ak sú stacionárny a užívateľským prijímač na rovnakej LAN sieti alebo používané GPS prijímače majú vbudovaný internetový modem môže byť toto zariadenie vynechané a dáta budú vymenené priamo medzi prijímačmi. V prípade agregácie dát viacerých prijímačov je potrebný server fungujúci ako agregátor a distribútor týchto dát. Z tohto zavedenia je možné určiť štyri rôzne role, ktoré musia byť pre správnu funkčnosť NTRIP komunikácie splnené a to sú: tzv. NTRIPSource, NTRIPServer, NTRIPClient a NTRIPCaster. NTRIPServer a NTRIPClient fungujú ako klienti v typickom význame v oblasti sietí, zatiaľ čo NTRIPCaster funguje ako server v tomto zmysle. Teda NTRIPServer naviaže spojenie s NTRIPCaster programom a odšle mu GNSS dáta, zatiaľ čo po naviazaní spojenia medzi NTRIPClient a NTRIPCaster programami sú dáta odosielané z NTRIPCaster serveru. Nasledujúce podkapitoly opisujúce tieto komponenty sú prevzaté z oficiálnej dokumentácie [4].



Obr. 2.9: Komunikácia jednotlivých NTRIP komponentov [4]

NTRIPSource

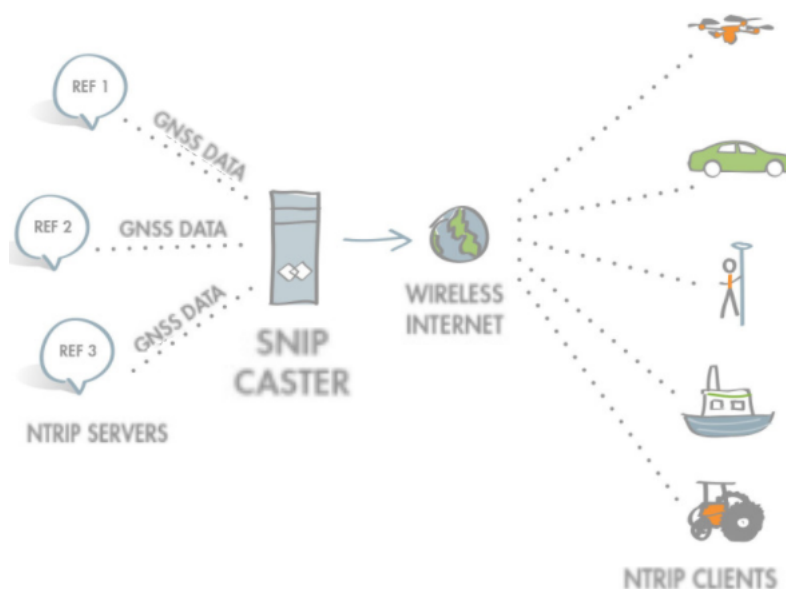
NTRIPSource predstavuje jeden konkrétny zdroj GNSS dát v konkrétnej lokalite vo svete. Tieto dáta sú v prípade tejto práce RTCM korekcie konkrétneho referenčného prijímača vo formáte RTCM3. Tieto dáta môžu obsahovať nielen informácie potrebné pre vykonávanie RTK korekcií ako nameraná fáza L1 a/alebo L2 signálu, ale aj informácie o prijímači ako napríklad používaná anténa, pomer carrier-to-noise, teda pomer signálu a šumu pre jednotlivé L1 alebo L2 signály, atď.. Každý NTRIPSource vyžaduje vlastný „mount point“ v NTRIPCaster programe. Mount point je jedinečné ID identifikujúce daný NTRIPSource. Pri pripojení NTRIPClient k NTRIPCaster-u si užívateľ vyberá práve z prístupných mount point-ov, takisto informácie ukladané NTRIPCaster-om sú ukladané pod daným mount point menom.

NTRIPServer

NTRIPServer je používaný na prenos GNSS dát z NTRIPSource do NTRIPCaster-u. Pred odoslaním dát pomocou TCP/IP spojenia server najprv odošle žiadosť použitím protokolu HTTP o nadviazaní spojenia pre určitý mount point. V tejto žiadosti je zahrnuté aj heslo (pokiaľ bolo správcom služby nastavené) a meno pre daný mount point. Po tejto autentizácii je možno naviazať TCP/IP spojenie pre odosielanie GNSS dát. V praktickom zavedení s modernými prijímačmi, ako to je aj v tejto práci, NTRIPServer mnohokrát nie je aplikácia bežiaca na samostatnom zariadení ale táto funkcionality je vbudovaná do samotného prijímača ktorý zároveň spĺňa funkcionality NTRIPSource aj NTRIPServer. V takomto prípade informácie nutné pre nadviazanie spojenia ako mount point, heslo, IPv4 adresa NTRIPCaster programu sú vkladné priamo do samotného prijímača. Príklad NTRIP 1.0 správy pre poskytnutie RTCM dát:

```
SOURCE password /MyBase
Source-Agent: NTRIP myTool/rev
STR: Glendora, CA;RTCM 3.1;1004(1),1005(10),1012(1);2;GPS+GL0;SNIP;USA;
      34.13;-117.83;0;0;sNTRIP;none;N;N;0;;
Accept: */*
Connection: close
```

Táto správa patrí k mount point-u nazvaným „MyBase“ s heslom „password“, pričom kľúčové slovo SOURCE značilo zasielanie toku dát (založené podľa protokolu shoutcast). Kľúčové slovo „STR“ značí Stream GNSS dát, pričom tento stream pochádza pre mesto Glendora v Kalifornii. Zasielané dáta sú vo formáte RTCM 3.1 s poskytovanými správami typu 1004, 1005 a 1012. Pričom správy 1004 a 1012 sú zasielané raz za sekundu a správa 1005 je zasielaná raz za 10 sekúnd.



Obr. 2.10: Zjednodušený popis funkcionality NTRIP Caster programov.

Upravené z [26]

NTRIPCaster

NTRIPCaster slúži ako vysielateľ pre GNSS dáta pochádzajúce z rôznych NTRIPServer-ov a tieto dáta ďalej podáva NTRIPClient programom. *Vo svojej podstate, NTRIPCaster programi, slúžia ako HTTP server podporujúci podmnožinu HTTP žiadostí/odpovedí, ktorý bol upravený pre toky dát s malou veľkosťou (50 B/s - 500 B/s pre každý tok dát) [4]* Žiadosti prichádzajú na jeden predom nastavený port, v prípade tejto práce, port 2101. Po príchode žiadosti je určené, či požiadavka prišla z programu typu NTRIPClient alebo NTRIPServer a následne program začne prijímať alebo odosielať GNSS dáta.

NTRIPClient

NTRIPClient spĺňa funkcionality prijímania GNSS dát, v prípade tejto práce, sa jedná o RTCM dáta vo formáte RTCM3. Pre úspešné naviazanie TCP/IP spojenia musia byť zadane správne argumenty potrebné pre toto spojenie a to sú: adresa pre NTRIPCaster, prislúchajúci port a žiadaný mount point. V prípade, že mount point nebol poskytnutý, alebo nie je dostupný NTRIPCaster navráti interne udržiavaný *source-table* respektíve *source list*. Táto tabuľka poskytuje informácie o samotnom NTRIPCaster-i, ako aj o všetkých mount point-och, ktoré sú momentálne dostupné. Pre RTCM stream (mount point) sú v tejto tabuľke definované typy RTCM dát, ktoré daný mount point poskytuje. Najčastejšie poskytované RTCM dáta sú:

- 1004 - rozšírené L1 & L2 GPS RTK sledovania,
- 1012 - rozšírené L1 & L2 GLONASS RTK sledovania,
- 1019 - vysielané GPS efemeridy (orbity),
- 1020 - vysielané GLONASS efemeridy (orbity),
- 1008 - popis antény,
- atď.

Kapitola 3

Implementácia

Pre riešenie DGPS časti problematiky tejto diplomovej práce som sa rozhodol inšpirovať službami CZEPOS¹, RTK2Go², EUREF³. Teda službami zameranými na poskytovanie RTK funkcionality pre prijímače cez internetový protokol. Pre tieto účely je používaný protokol NTRIP. Tento protokol umožňuje jednoduché vysielanie a prijímanie korekčných DGPS dát vo formáte RTCM3 cez internetový protokol. Pre spĺňanie funkcionality NTRIPCaster programu som zvolil program SNIP⁴ od firmy SubCarrier Systems. SubCarrier Systems poskytuje verejne prístupnú službu RTK2go, založenú na báze SNIP. RTK2go umožňuje registráciu vlastnej RTK referenčnej stanice do verejnej databázy, na ktorú je následne možné pripojenie užívateľského prijímača, pričom prijímač bude čerpať korekčné dáta z vybraného referenčného vysielateľa. Využitie tejto služby je veľmi jednoduché a poskytuje výbornú neplatenú alternatívu k plateným službám ako CZEPOS v prípade dostatočne blízkej referenčnej stanice. Táto služba bohužiaľ neposkytuje možnosť administrácie a náhľadu na poskytované korekčné dáta a teda pre akademické účely tejto práce, táto možnosť nie je vhodná. Z tohto dôvodu, miesto využitia tejto služby som sa rozhodol vytvoriť vlastnú NTRIP sieť s využitím programu SNIP fungujúcim ako NTRIPCaster.

Nasledujúcou problematikou tejto práce bola tvorba webovej aplikácie pre zobrazovanie získaných pozičných dát pomocou platformy mapy.cz. Pre túto schopnosť som sa rozhodol vytvoriť webovú aplikáciu pomocou frameworku Flask pre jazyk Python3. Primárnym dôvodom využitia práve frameworku Flask bola osobná skúsenosť a popularita tohoto frameworku, ktorá umožňovala veľmi jednoduchú integráciu pomocou už existujúcich balíčkov. Ako nadstavba pre túto aplikáciu bola sprevádzkovaná aj databáza pre umožňovanie prihlásenia užívateľov. Pre hostenie tejto databázy, bola vybraná platforma Azure z dôvodu osobnej skúsenosti s prácou s touto platformou, prehľadnej dokumentácie a veľkému množstvu dostupných inštruktážnych zdrojov. Zavedenie databázy, takisto umožňuje aj ďalšie možnosti v prípade budúceho vývoja tejto aplikácie ako zavedenie možnosti ukladania a načítania meraní pre užívateľov, automatická tvorba štatistík z nameraných dát, atp.. Tieto dodatočné funkcionality však v momentálnom stave aplikácie nie sú implementované.

¹http://czepos.cuzk.cz/_index.aspx

²<http://www.rtk2go.com/>

³<https://www.epncb.oma.be/>

⁴<https://www.use-snip.com/>

3.1 Prehľad možností implementácie RTK korekcií

V momentálnej dobe existuje rada riešení umožňujúcich viacero prístupov pre získavanie RTK korekcií. V prípade, že užívateľ chce využívať funkcionality RTK bez sprevádzkovania vlastného referenčného prijímača alebo svoju sieť chce obohatiť o ďalšie prijímače, existuje viacero CORS (Continuously Operating Reference Stations) sietí. Tieto siete poskytujú dlhodobu prístupnú referenčnú stanicu, ktorých korekčné dáta sú prístupné buď za príplatok ako napríklad regionálne služby CZEPOS, SKPOS, atď., alebo voľne prístupné CORS siete ako napríklad EUREF, IGS, AUSCORS, RTK2go atď.. Bezplatne prístupné verejné CORS siete ako spomínané EUREF, IGS a AUSCORS poskytujú veľké množstvo kvalitných referenčných staníc, avšak tieto siete pokrývajú veľmi veľkú oblasť, napr. EUREF pokrýva väčšinu európskych štátov, a teda tieto siete sú často krát limitované malou hustotou staníc a teda aj svojim pokrytím a dostupnosťou. Tieto siete a ich stanice sú organizované a prevádzkované pod záštitou (alebo v spolupráci s) národných, prípadne nadnárodných organizácií napr. sieť AUSCORS je prevádzkovaná pod záštitou austrálskej vlády. Služba RTK2Go prevádzkovaná firmou SubCarrier Systems je priamo závislá od svojich užívateľov, ktorým poskytuje možnosť registrácie vlastnej stanice do siete RTK2Go, ktorej dáta budú následne verejne prístupné. Z tohto dôvodu je kvalita a dostupnosť referenčných staníc priamo závislá od lokality, v ktorej sú korekcie požadované. Platené regionálne služby ako CZEPOS, SKPOS, a pod. disponujú veľkým počtom staníc a pokrývajú iba limitované územie (najčastejšie 1 štát) a teda disponujú vysokým pokrytím územia, v ktorom pôsobia. Primárnou výhodou týchto služieb je možnosť poskytnutia služby virtuálnej referenčnej stanice v následku veľkého počtu blízkych referenčných staníc. Táto služba poskytuje spôsob pre vytvorenie simulovanej referenčnej stanice pár metrov od pozície užívateľa. Pre vytvorenie pozorovaní takejto stanice sú použité pozorovania z viacerých blízkych referenčných staníc. Vyplyvajú z rovnice 2.17 je jasné, že čím je rozdiel chyby spôsobovanej troposférou a ionosférou v umiestnení referenčnej stanice oproti miestu užívateľského prijímača väčší, tým je získaná pozícia nepresnejšia. Táto technológia umožňuje zmenšenie chýb spôsobených vzdialenosťou od referenčnej stanice. Táto schopnosť vyplýva zo schopnosti odhadu chyby ΔT a ΔI v mieste merania použitím pozorovaní blízkych referenčných staníc.

V prípade, že vyššie spomínané riešenia nie sú vhodné pre konkrétne potreby požadovanej implementácie, ako to je v prípade tejto práce, nasledujúca možnosť je zavedenie vlastnej referenčnej stanice pre získanie pozorovaní. Pri tejto možnosti existujú viaceré alternatívy, ktorých výhody a nevýhody môžu byť vhodné pre rôzne situácie. V rozsahu tejto práce som sa primárne zameriaval na možnosti využívajúce komunikáciu použitím internetu. Zatiaľ čo predávanie korekčných dát dokáže prebiehať cez rôzne médiá ako rádiová, sériová alebo bluetooth komunikácia, prípady pre takéto riešenia sú menej obvyklé a teda nebudú hlbšie rozoberané. Ak dané prijímače použité ako užívateľský a referenčný prijímač umožňujú odosielanie aj prijímanie RTK korekcií pomocou TCP komunikácie je možné protokol NTRIP a k nemu potrebnú infraštruktúru vynechať a komunikáciu uskutočňovať výhradne pomocou TCP spojení. V tomto prípade sa dané stanice nachádzajú na rovnakej LAN (Local Area Network) sieti, poprípade referenčná stanica má možnosť zavedenia verejnej IP adresy spolu s adekvátnym presmerovaním portu pre umožnenie TCP komunikácie aj mimo lokálnej siete. Toto zavedenie má nevýhodu nutnosti spojazdnenia verejnej IP adresy a portu pre každú referenčnú stanicu na mieste stanice, prípadne veľmi limitovanej vzdialenosti meraní pri použití LAN komunikácie. Prijímače Reach Module sú tejto komunikácii schopné avšak z uvedených dôvodov je daná implementácia komunikácie nevhodná pre problematiku práce a teda je nutné nasaadiť NTRIP infraštruktúru ako vysvetlené v kapitole 2.4.

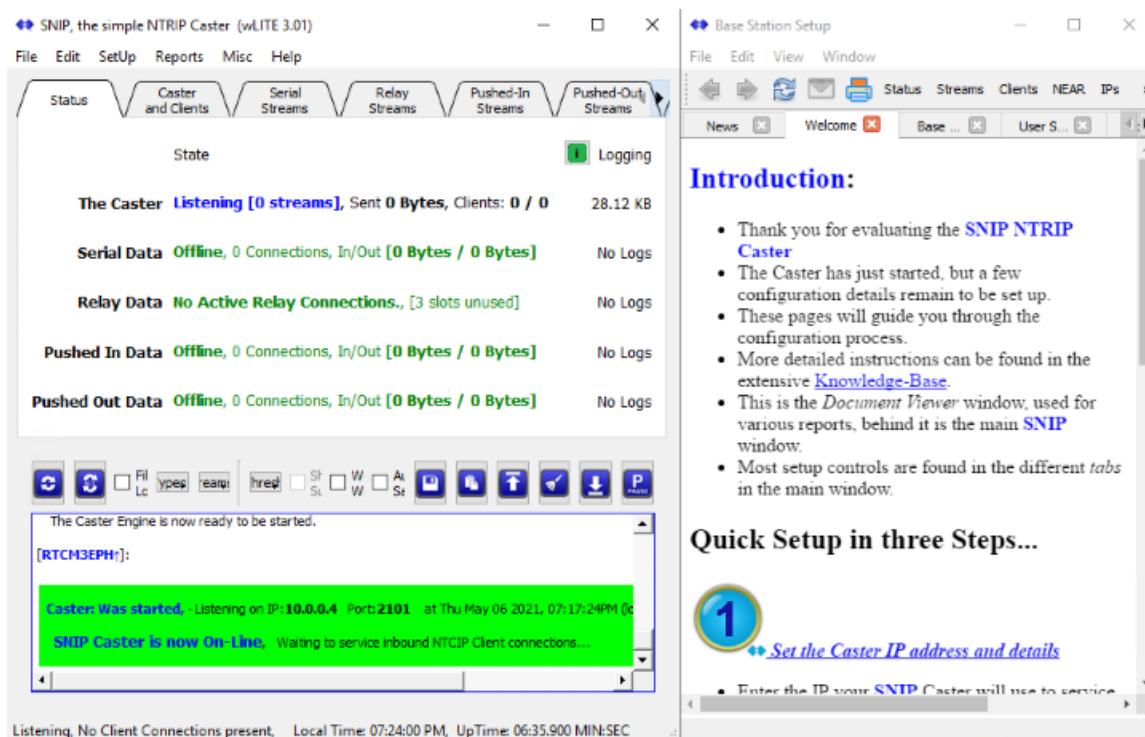
Pre možnosť využitia RTK funkcionality za použitia protokolu NTRIP s vlastnou referenčnou stanicou je nutné disponovať NTRIPCaster programom fungujúcim ako je uvedené v kapitole 2.4. Populárnymi programami pre túto úlohu sú open source program RTKLib alebo komerčná alternatíva SNIP použitá v tejto práci. Ďalšou možnosťou je využitie služby ponúkanej viacerými komerčnými firmami, ktoré zabezpečia sprevádzkovanie a hostenie NTRIPCaster služby miesto užívateľa. Pri takýchto službách je jediným krokom pre užívateľa iba zadanie poskytnutých informácií ako webová adresa, port, heslo a mount point do referenčných a užívateľských prijímačov. Tieto služby zahŕňajú napríklad bezplatné služby Emlid Caster a RTK2Go, prístupné sú aj platené alternatívy napr. od firmy SubCarrier Systems. Spomínané bezplatné verzie sú obmedzené maximálnym počtom referenčných staníc a sú určené primárne pre súkromné osoby. Pre akademické a náučné účely tejto práce som sa rozhodol vyhnúť týmto službám a sprevádzkovať vlastné nasadenie NTRIPCaster programu pre možnosť administrácie a prehľadu poskytovaných korekčných dát.

3.2 Implementácia NTRIP infraštruktúry

Zámerom tejto kapitoly je informovať čitateľa o spôsobe sprevádzkovania vlastnej GNSS siete s využitím prijímačov Reach Module a teda aj o postupe použitom v tejto práci. Takisto by čitateľ mal byť informovaný o postupe získavania RTK korekcií poskytovaných referenčným prijímačom sprevádzkovaným ako súčasť tejto diplomovej práce. Prvá podkapitola kapitoly 3.2 sa zameriava na informácie o GNSS prijímači Reach Module a spôsobe sprevádzkovania daného prijímača. Posledná kapitola sa zameria na údaje potrebné pre sprevádzkovanie a využívanie ľubovolnej siete poskytujúcej RTK korekcie pomocou formátu NTRIP.

Podstatnou požiadavkou pre zariadenie, ktoré má slúžiť ako NTRIPCaster server je prístup k verejnej IPv4 adrese pre toto zariadenie s možnosťou otvorenia a presmerovania portu pre obsluhu NTRIPClient a NTRIPServer zariadení. Z tohto dôvodu je v tejto práci služba NTRIPCaster spojená na virtuálnom stroji v cloudovej platforme Microsoft Azure. Operačný systém zvolený pre tento stroj je Microsoft Windows Server 2019 s konfiguráciou *Standard B2s*. Rozhodol som sa pre platformu Microsoft Azure vďaka prehľadnej dokumentácii a množstvu dostupných inštruktážnych zdrojov k tejto platforme. Konfigurácia virtuálneho stroja *Standard B2s* poskytuje pamäť RAM o veľkosti 4GiB s dvomi virtuálnymi procesormi schopnými 1280 IOPS(input/output operácie za sekundu). Táto konfigurácia bola zvolená pre naplnenie odporúčanej veľkosti pamäte RAM pre aplikáciu SNIP o veľkosti aspoň 4GiB za relatívne nízku cenu – 0.05€ za hodinu neustálej operácie. Pre umožnenie komunikácie pomocou poskytnutej verejnej statickej IPv4 adresy je nutné pridať pravidlo pre umožnenie prichádzajúcich spojení pre port používaný aplikáciou NTRIPCaster najčastejšie používaný je port 2101. Toto pravidlo je nutné pridať ako aj v portáli platformy Azure⁵ na zvolenom virtuálnom stroji v časti „Networking“, tak aj pre firewall operačného systému daného stroja. Ďalší krok po sprístupnení tohoto zariadenia je inštalácia NTRIPCaster aplikácie. Ako bolo spomenuté, pre splnenie tejto role bol vybraný program SNIP od firmy SubCarrier Systems. Pre inštaláciu tohto programu je potrebné si zakúpiť bezplatnú verziu na stránke <https://www.use-snip.com/download/>. Následne, zakúpený softvér musí byť stiahnutý a nainštalovaný na virtuálnom stroji.

⁵<https://portal.azure.com/>



Obr. 3.1: Program SNIP sprevádzkovaný na virtuálnom stroji platformy Microsoft Azure

Po inštalácii je potrebné zaregistrovať program pod licenciu *Lite*. Môže byť zakúpená aj platená licencia v prípade použitia viac ako troch referenčných staníc, potreby *Raw TCP/IP* pripojení pre GPS prijímače neschopné NTRIP komunikácie alebo iných funkcionalít neprístupných pod bezplatnou licenciou *Lite*. Posledným krokom v sprevádzkovaní programu je správna definícia nastavení a spustenie NTRIPCaster služby kliknutím na tlačítko „Connect“ pod záložkou „Caster and Clients“. Vysvetlenia a návody pre správnu definíciu nastavení ako Caster IP, hesla, anonymných pripojení sú prehľadne spísané vo vedľajšom okne, ktoré je zobrazené pri každom spustení (viď. obr. 3.1). NTRIPCaster aplikácia sprevádzkovaná ako súčasť tejto práce je prístupná cez IPv4 adresu <http://20.86.107.85:2101/> alebo pod doménovým menom <http://fitnav.westeurope.cloudapp.azure.com:2101/>.

Reach Module

Ďalšou časťou NTRIP infraštruktúry je vhodne umiestnená aspoň jedna referenčná stanica slúžiaca ako NTRIPSource. V prípade tejto práce sa jedná o prijímač Reach Module od firmy Emlid s poskytnutou anténou Tallysman TW4721. Anténa referenčnej stanice musí byť vhodne umiestnená. Teda v pozícii s čo najlepším výhľadom na oblohu – bez prekážok vyšších ako 30° nad horizontom. Anténa by sa takisto nemala nachádzať v blízkosti elektroniky, ktorá by bola schopná spôsobovať interferenciu signálu. Pre zlepšenie signálu je vyžadované umiestnenie antény na kovový povrch o veľkosti aspoň 70x70 mm. Tento povrch zaručuje zmenšenie chybovosti z multipath propagácie, teda chybovosti spôsobovanej odrazom signálu z okolitých objektov k anténe. Pri výbere polohy musí byť zohľadnený takzvaný *baseline* užívateľského a referenčného prijímača. Baseline značí vzdialenosť referenčnej stanice a užívateľského prijímača. Podľa špecifikácie firmy Emlid, pre Reach Module je efektívny baseline pre jednofrekvenčné prijímače v RTK móde 10km [8].

Umiestnenie antény a prijímača je jeden z kľúčových aspektov presnej RTK navigácie a teda musí byť veľmi pozorne určené vhodné miesto.

Prijímače Reach Module takisto vyžadujú pripojenie na bezdrôtovú Wi-Fi sieť. Nastavenia pre komunikáciu NTRIP, špecifikácie GNSS nastavení, výstupných formátov dát a podobne sú nastaviteľné v aplikácii ReachView 2/3 poskytovanou firmou Emlid. Tieto aplikácie sú určené pre upravovanie nastavení, sledovanie stavu a spravovanie zariadenia. Počiatočný krok je zapojenie prijímača Reach Module na vhodný zdroj energie (5V). Prijateľné spôsoby sú buď pomocou USB portu typu Micro alebo pomocou jedného z DF13 portov je kritické nepoužívať oba spôsoby naraz, inak môže dôjsť k poškodeniu prijímača. Následne, pri prvom nastavení alebo v prípade, že nastavená Wi-Fi sieť nie je dostupná, by LED žiarivka na prijímači mala prejsť nasledovnými cyklami:

- stále biele svetlo (inicilizácia zariadenia),
- rýchle modré blikanie (hľadanie siete Wi-Fi),
- prepínanie medzi bielym a zeleným svetlom (hotspot mód & dostupné zariadenie).

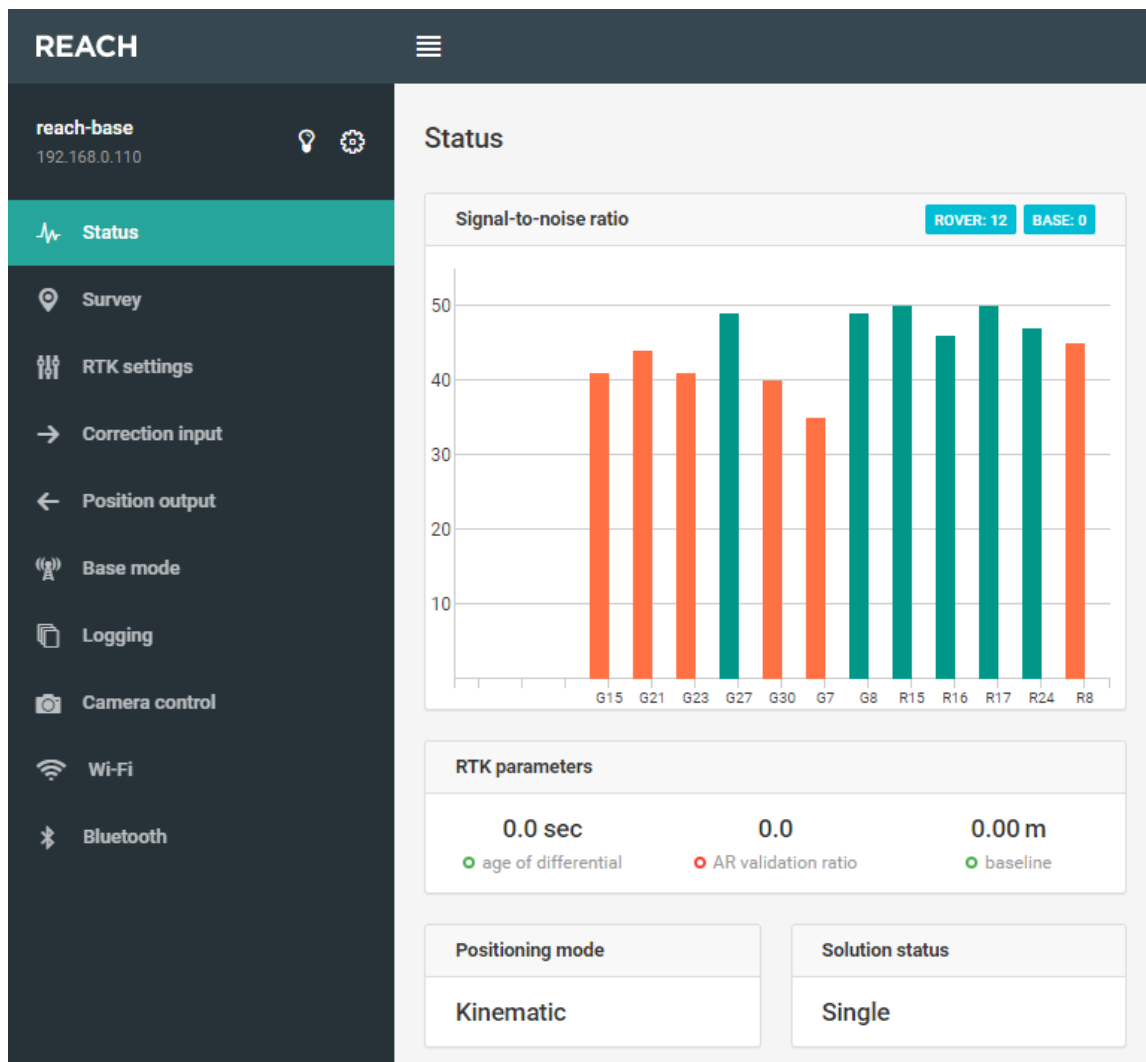
Vo finálnom stave zariadenie funguje správne a vytvorilo vlastný prístupový bod Wi-Fi s menom **reach:xx:xx** a heslom **emlidreach**. Pre prístup k nastaveniam prijímača je nutné sa pripojiť na vytvorený prístupový bod s vlastným zariadením. Pre pripojenie na zariadenia Reach Module je odporúčané zariadenie s operačným systémom IOS alebo Android, a to z dôvodu existencie užívateľsky prijateľských aplikácií ReachView 2 a ReachView 3. Spôsob prvotného nastavenia prijímača Reach Module pri použití Android alebo IOS zariadenia pomocou aplikácie ReachView 3 je pomerne jednoduchý. Po pripojení sa na vytvorený prístupový bod reach:xx:xx a spustení aplikácie ReachView 2 alebo ReachView 3 by sa malo zariadenie po krátkom hľadaní zobrazíť. Alternatívne, pri nedostupnosti aplikácie ReachView 2 alebo ReachView 3 je možné pripojiť sa na adresu <http://192.168.42.1>, na ktorej je hostovaná webová aplikácia *ReachPanel*. Táto webová aplikácia umožňuje prístup z akéhokoľvek zariadenia a nepotrebuje prístup na internet pre jej používanie. Následne je možné pridať Wi-Fi sieť, ktorá bude prístupná počas meraní daného prijímača. V prípade užívateľského prijímača boli zadané údaje pre prístupový bod tvorený mobilným zariadením a pre stacionárny prijímač boli zadané údaje domovskej siete. V prípade, že zariadenie nefunguje podľa očakávania, ako v prípade prvého spoznajdenia prijímačov tejto práce, môže byť potrebné urobiť reinstaláciu firmvéru zariadenia. V tomto prípade je potrebné stiahnuť najnovšiu verziu firmvéru a postupovať podľa krokov odporúčaných firmou Emlid na stránke: <https://docs.emlid.com/reach/reach-panel/firmware-reflashing>.

Po zadaní údajov Wi-Fi siete, sa prijímač Reach Module automaticky pokúsi pripojiť na danú sieť a upozorní užívateľa na ukončenie momentálneho spojenia a potrebe prepojenia sa zadanú adresu Wi-Fi. Pre nasledovný krok je prístup cez aplikácie ReachView rovnaký ako pri počiatočnom nastavení. Pre prístup k webovej aplikácii pre novšie prijímače od firmy Emlid je ReachPanel možné použiť pomocou webovej adresy <http://reach.local>. Pre prijímače Reach Module je ale nutné zistiť novú IPv4 adresu prijímača. Vyhľadanie novej IPv4 adresy môže byť vykonané rôznymi komerčnými programami ako napríklad *AngryIPScanner*⁶ alebo príkazom `arp -a` v príkazovom riadku. Tento príkaz vypíše tabuľku používané protokolom ARP (address resolution protocol). Takto je možné vidieť iba IP adresu a k nej príslušnú MAC adresu. Ďalej je možné zistiť, že firma dodávajúca sieťové adaptéry pre Reach Module produkty je Murata Manufacturing [9] a teda je možné určiť, že

⁶<https://angryip.org/download/#windows>

hľadaná IP adresa má príslušnú MAC adresu začínajúcu **90-B6-86**. Následne všetky adresy, ktoré vyhovujú tejto požiadavke otestujeme pokusom o pripojenie cez webový prehliadač. Na obrázku 3.2 je vidieť spustenú webovú aplikáciu ReachPanel pre referenčnú stanicu. Táto stanica funguje bez používania RTK alebo DGPS korekcií v takzvanom *Standalone GNSS* móde. Je viditeľných 12 GNSS družíc. Družice s označením G patria ku konštelácii GPS, označenie R značí konšteláciu Glonass, označenie E značí družice konštelácie Galileo, označenia J a C značia konštelácie QZS a Beidou. „Positioning mode: Kinematic“ značí, že daná stanica sa môže hýbať, pri nastavení módu *Static* by mala byť stanica nehybná.

Premenná „Solution status“ značí podľa akej technológie je pozícia získavaná. Táto premenná nadobúda stavy: *Single*, *Float* a *Fixed*. Tieto stavy značia kvalitu získanej pozície. Stav *Single* značí využívanie technológie GNSS ako je to vysvetlené v kapitole 2.1. Stav *Float* značí použitie RTK korekcií, avšak problém integer ambiguity nebol vyriešený. Tento problém bol naznačený v kapitole 2.3. Počas tohoto stavu sú korekcie iba zohľadnené pri výpočte polohy. Stav *Fixed* značí vyriešenie problému integer ambiguity a poloha prijímača je počítaná ako poloha relatívna k polohe referenčného prijímača.



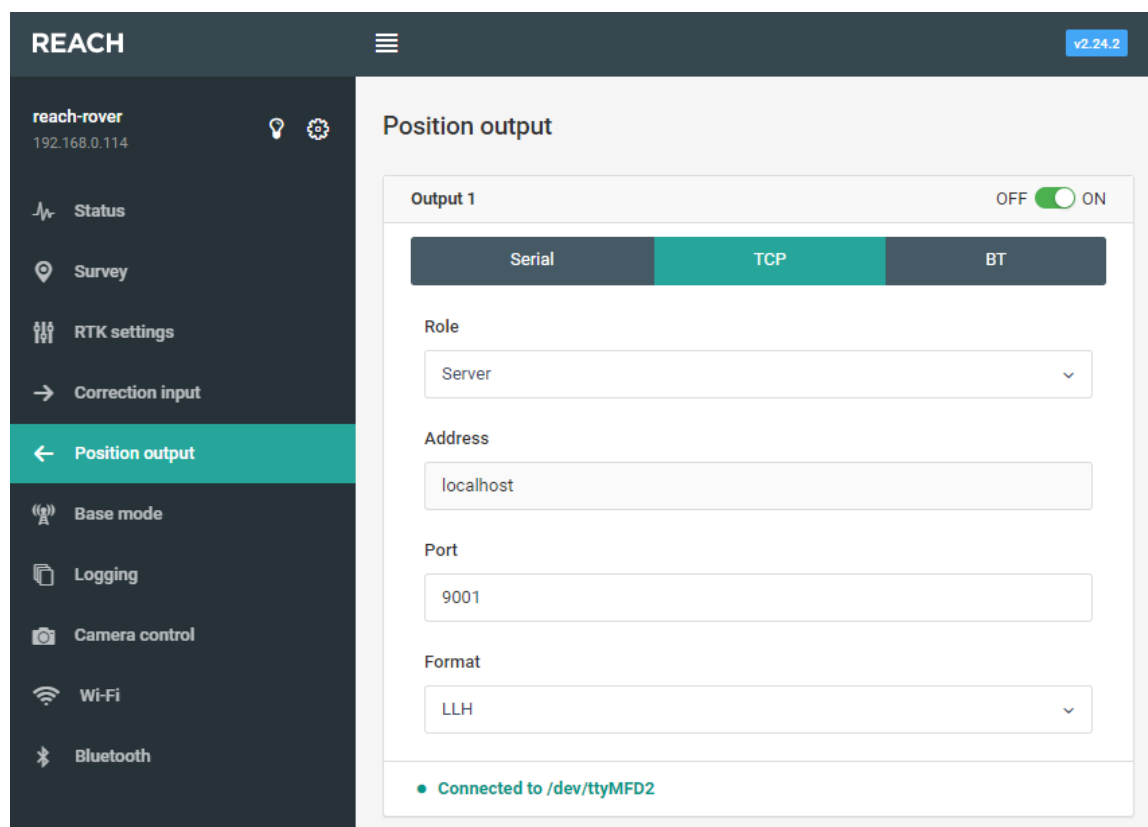
Obr. 3.2: Webová aplikácia ReachPanel s vybranou záložkou Status

NTRIPServer & NTRIPClient

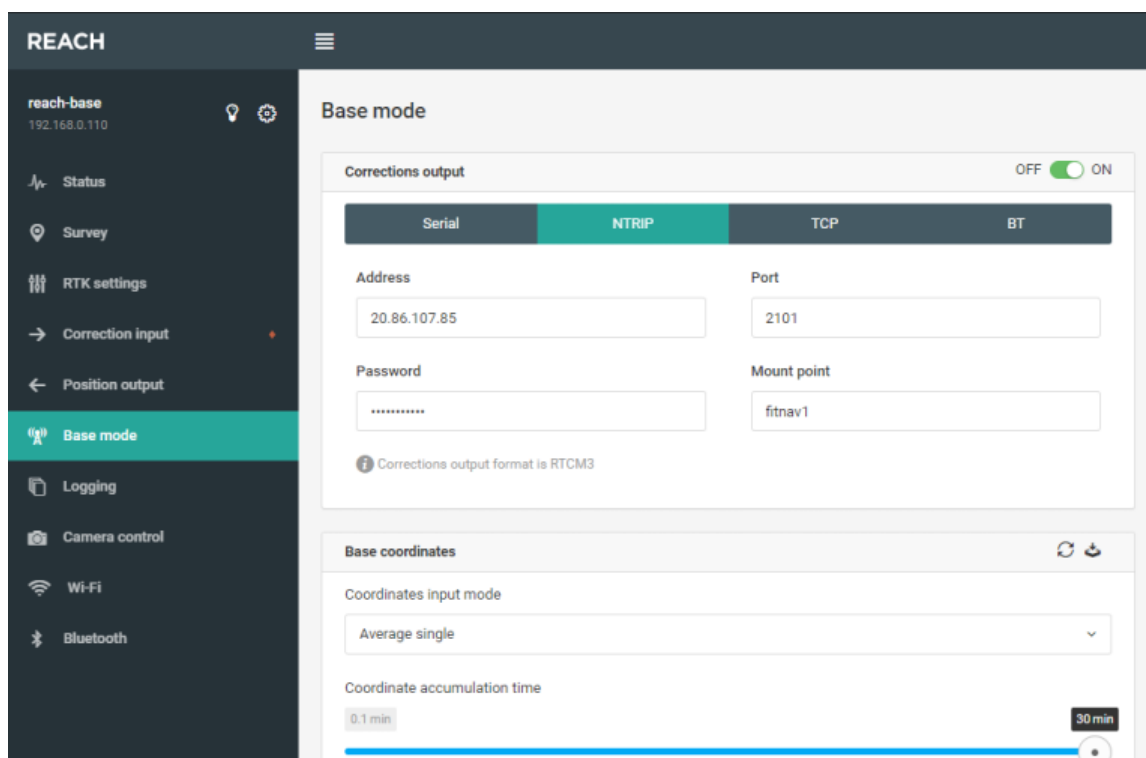
Po získaní prístupu k prijímaču s pripojením na internet je finálny krok nastavenie prijímačov. Je potrebné zadať informácie nastavené v programe SNIP a platforme Azure. Tieto informácie zahŕňajú IPv4 prípadne doménovú adresu zariadenia, na ktorom je spozajzdnená aplikácia SNIP, číslo portu, na ktorom aplikácia očakáva požiadavky a meno pre mount point referenčnej stanice. V prípade nastavenia môže byť požadované aj prihlasovacie meno a heslo, ale táto požiadavka je závislá od administrátora danej NTRIP siete. Pri registrácii mount point-u do SNIP caster aplikácie je autentizácia heslom povinná.

Pre prijímač slúžiaci ako mobilný užívateľský prijímač je nutné nastaviť v záložke *Correction Input* zvýraznenou červenou bodkou na obrázku 3.4. Prístup k NTRIP sieti vytvorenej v tejto práci je možný pod IPv4 adresou 20.86.107.85 a portom 2101. Meno pre mount point používaný pre RTK korekcie je *fitnav1* viditeľný na obrázku 3.4. Používateľské meno a heslo nie je pre potrebné. Ďalej je nutné overiť nastavenia pre správnu integráciu s webovou aplikáciou FITNav opisovanou v kapitole 3.3, ktoré sa nachádzajú pod záložkou *Position Output*. Je nevyhnutné zabezpečiť výstup pozičných dát pomocou TCP serveru s požadovaným formátom dát LLH ako je to viditeľné na obrázku 3.3.

Pre prijímače slúžiace ako referenčné stanice je nutné nastaviť IPv4 adresu, port používaný aplikáciou SNIP, meno vytváraného mount point pripojenia a heslo požadované na autentizáciu, ako je viditeľné na obrázku 3.4. Zvyšné nastavenia sú závislé od požiadaviek užívateľa a prístupných možností pre určovanie pozície. Tieto nastavenia sa nachádzajú pod záložkami *RTK settings*, *Position Output* a *Base mode*.



Obr. 3.3: Webová aplikácia ReachPanel s vybranou záložkou Position Output mode



Obr. 3.4: Webová aplikácia ReachPanel s vybranou záložkou Base mode

3.3 Webová aplikácia FITNav

Zobrazovanie polohy vo webovej aplikácii FITNav je vykonávané dvoma rôznymi aplikáciami. Pre zobrazovanie dát zaslaných na webovú stránku je sprevádzkovaná webová aplikácia (FITNav) na doménovej adrese <http://fitnav.westeurope.cloudapp.azure.com/>. Pre získavanie a zasielanie dát je vytvorená užívateľská aplikácia v jazyku Python3 (FITNav-Client). Po určení polohy je pri správnych nastaveniach pozícia vo formáte LLH vysielaná pomocou TCP serveru hostovanom na prijímači Reach Module. Pre zobrazenie pozície je najprv nutné získať pozičné dáta z prijímača na zariadenie pomocou aplikácie FITNav-Client. Pre funkčnosť tejto aplikácie je nutné zaručiť schopnosť TCP komunikácie medzi zariadením, z ktorého budú dáta zasielané a používaným prijímačom. Pre splnenie tejto požiadavky je nutné poznať IPv4 adresu priradenú prijímaču a následne použitím príkazu `ping` v príkazovom riadku môže byť otestované spojenie. Spôsob pre získanie IPv4 adresy prijímača je napríklad použitím príkazu `arp -a` v príkazovom riadku. Hlbšie informácie o tomto postupe sú uvedené v kapitole 3.2. Po spustení aplikácie je z počiatku nutné zadať informácie potrebné pre získavanie a zasielanie dát. Tieto informácie sú:

- IPv4 adresa Reach Module prijímača,
- port, na ktorom sú požiadavky pre pozičné dáta obsluhované,
- prihlasovacie meno (pokiaľ užívateľ požaduje prihlásenie),
- prihlasovacie heslo (pokiaľ užívateľ požaduje prihlásenie).

Po zadaní údajov sa aplikácia pokúsi o nadviazanie spojenia, v prípade, že spojenie nebolo možné nadviazať je aplikácia ukončená s príslušnou chybovou správou. Pre nadviazanie

a udržiavanie TCP komunikácie bol použitý objekt *socket* z modulu *socket* prístupným v jazyku Python3. Po naviazaní TCP spojenia s prijímačom Reach Module pomocou poskytnutej IPv4 adresy sú pozičné dáta spracované a je overená správnosť formátu LLG. K spracovaným dátam je následne pridané vygenerované jedinečné užívateľské identifikačné číslo (UUID). Pre prihlásených užívateľov je toto UUID automaticky nastavené na hodnotu patriacu prihlásenému účtu. Pre generovanie UUID je používaná metóda *uuid4* z triedy *uuid* poskytovanou jazykom Python3. Následne sú všetky pozičné dáta vo formáte JSON zaslané do webovej aplikácie pomocou HTTP požiadavky typu POST. Pre zasielanie POST požiadavky s protokolom HTTP bola využitá funkcia *post* z balíku *requests*. Príklad zasielaných dát:

```
{
  "x": 48.020258394,
  "y": 18.408524854,
  "UUID": 77501351313456438058157540974131562182,
  "time": "2021-05-03T15:00:02+0100"
}
```

Webová aplikácia aplikácia FITNav je založená na frameworku Flask a využíva integráciu s SQL databázou hostovanou na platforme Azure a pamäťovou databázou Redis pre uskladňovanie trvalých dát (prihlasovacie údaje) a dočasných dát (pozičné dáta). Samotná webová aplikácia sa delí na štyri podstatné časti. Tieto časti sú:

- `/index` zaobstaráva načítanie stránky, prihlasovanie a registráciu,
- `mapa.js` zaobstaráva načítanie mapy a zobrazenie pozičných dát,
- `/post_data` zaobstaráva spracovanie a ukladanie pozičných dát,
- `/get_data` zaobstaráva načítanie pozičných dát

`/index`

Táto časť webovej aplikácie zaobstaráva prihlasovanie, registráciu a načítava súbor `index.html`. Pre vytváranie a prácu s formulármi používanými pre prihlásenie a registráciu používateľov sú používané balíky *WTForms* [38] a *Flask-WTForms* [18]. WTForms je široko používaný balík pre vytváranie, zabezpečovanie a validáciu užívateľských HTML formulárov pre webové aplikácie vytvorené v jazyku Python3. Pre jeho jednoduchú integráciu do frameworku Flask je použitý balík Flask-WTF. Toto zavedenie je vysoko populárny a viac-menej štandardný spôsob zavádzania užívateľských formulárov. Formuláre sú definované ako dedičné triedy zo základnej triedy `FlaskForm` definovanej balíčkom Flask-WTF. Následne je možné definovať polia daného formulára ako rôzne objekty, ktorých triedy sú definované balíčkom WTForms. Triedy použité v tejto aplikácii sú `StringField`, `PasswordField`, `SubmitField` a `BooleanField`. Následne pre každý objekt je pri jeho inicializácii možné zadať text pre dané pole formulára ako napr. „Username“ a potrebné validátory.

Ukážka definície prihlasovacej formy:

```
class LoginForm(FlaskForm):
    username = StringField('Username', validators=[
        InputRequired(message='Username Required'),
        Length(min=4, max=25,
            message= 'Username must be between 4 to 25
                characters')])
    password = PasswordField('Password', validators=[
        InputRequired(message='Password Required'),
        credentials_check])
    remember_me = BooleanField('Remember Me')
    submit = SubmitField('Sign In')
```

Tento kód definuje triedu `LoginForm` pre ktorú sú definované polia pre užívateľské meno, heslo, pole „Remember me“ slúžiace pre uchovanie prihlásenia medzi sedeniami a tlačidlo „Sign In“ slúžiace na zaslanie prihlasovacích údajov. Obmedzenia pre prihlasovacie meno sú nutnosť zadania akéhokoľvek reťazca a dĺžka je limitovaná medzi štyrmi a dvadsiatimi znakmi. Pole pre heslo je limitované nutnosťou zadania akéhokoľvek reťazca a vlastným validátorom `credentials_check` definovanom v súbore `forms.py` slúžiacim pre overenie zhody zadaných prihlasovacích údajov a prihlasovacích údajov, uvedených v databáze.

Pre integráciu a prácu s SQL databázou bol použitý balík *Flask-SQLAlchemy* [24]. Tento balík zabezpečuje objektovo relačné mapovanie pre framework Flask, teda zaisťuje konverziu dát medzi relačnou databázou a objektovo orientovaným programovacím jazykom. Tento balík adaptuje funkcionalitu balíku *SQLAlchemy* [1] pre framework Flask. Pre využívanie tohoto balíka je nutné pred inicializáciou webovej aplikácie inicializovať objekt z triedy *SQLAlchemy*, pričom musí byť definovaný správny prihlasovací reťazec k databáze. Tento reťazec je definovaný v súbore `config.py` v premennej `SQLALCHEMY_DATABASE_URI`. Následne je možné definovať triedy reprezentujúce SQL tabuľky respektíve entity v SQL databáze. Tieto triedy dedia všeobecné metódy z atribútu vytvoreného objektu pre databázu *Model*. Následne je možné definovať meno tabuľky a jej stĺpce. Definícia pre entitu „users“ sa nachádza v súbore `models.py` a vyzerá nasledovne:

```
class User(UserMixin, db.Model):
    """ User Model """
    __tablename__ = 'users'
    id = db.Column(db.Integer, primary_key=True)
    username = db.Column(db.String(25), unique=True, nullable=False)
    hashed_pwd = db.Column(db.String(), nullable=False)
```

Takto definovaná SQL tabuľka obsahuje 3 hodnoty: `id`, `username`, `hashed_pwd`. Pričom hodnota `id` slúži ako primárny kľúč pre tabuľku, hodnota `username` je jedinečný, neprázdny reťazec o maximálnej dĺžke dvadsaťpäť znakov a hodnota `hashed_pwd` je neprázdny reťazec.

Pri registrácii nového užívateľa je spoiatku využitá validácia registračného formulára pomocou vyššie spomenutých metód a následne je do databázy vložený nový objekt triedy *User*. Pre zabezpečenie hesla je plain-text heslo zašifrované pomocou algoritmu *pbkdf2_sha256* prístupného z balíčku *passlib* [5]. Pokiaľ nenastane neočakávaná chyba tak je užívateľ úspešne zaregistrovaný. Pri prihlasovaní užívateľa je po validácii formulára využívaný balík *flask-login* [13], ktorý zaobstaráva uchovanie prihlásenia medzi reláciami a spravuje relácie užívateľov.

V tejto práci je primárne využívaný pre udržiavanie objektu `current_user`, ktorý po prihlásení obsahuje údaje definované v triede `User` a pre udržiavanie prihlásenia užívateľa medzi reláciami.

mapa.js

JavaScript súbor `mapa.js` primárne využíva metódy poskytnuté rozhraním MapyAPI [19]. Pri načítaní súboru `index.html`, konkrétne HTML objektu typu `<div>` s id „mapa“ sa vytvorí myšou ovládateľná mapa centrovanej na miesto fakulty Informačných Technológií so zemepisnou šírkou 49.231754° a zemepisnou výškou 16.59238° . Táto mapa je tvorená objektom triedy `SMap` definovaným rozhraním MapyAPI. Na tejto pozícii sa následne vytvorí ukazovateľ pomocou vrstvy `SMap.Layer.Marker`, na ktorej je vytvorený objekt `SMap.Marker` s vyššie uvedenými súradnicami. Tento ukazovateľ je pri získaní pozičných dát užívateľa používaný pre určenie poslednej poznanej polohy užívateľa. Následne pri kliknutí tlačítka „Submit“, pre potvrdenie zadania požadovaného UUID (universally unique identifier), sa začnú zasielať HTTP požiadavky typu GET na relatívnu URL cestu `/get_data` s frekvenciou $1Hz$. Odpoveď na túto požiadavku obsahuje modifikovaný XML súbor s údajmi o trase prejdenej užívateľom identifikovaným pomocou zadaného UUID. Konkrétny názov pre túto modifikáciu XML sa nazýva GPX (GPS Exchange Format). Rozhranie MapyAPI poskytuje spôsob automatického spracovania GPX súborov a tvorbu trasy na vytvorenej mape pomocou vrstvy `SMap.Layer.GPX`. Pri inicializácii tejto vrstvy je predaný objekt obsahujúci GPX dáta a vytvorená vrstva obsahuje vykreslené dáta, ktoré boli uvedené ako odpoveď na odoslanú GET požiadavku. Pre udržiavanie iba najakutálnejších dát na mape je nutné zaistiť vymazanie predchádzajúcej vrstvy obsahujúcej GPX dáta z predchádzajúcej požiadavky. Toto je zaistované pomocou metódy `removeLayer()` nad objektom triedy `SMap` obsahujúcim vytvorenú vrstvu GPX.

MapyAPI

Princíp fungovania tohoto API je pridávaním vrstiev populovaných jednotlivými objektami prislúchajúceho typu (napr. objekty typu `SMap.Marker` na vrstvu `SMap.Layer.Marker`) na objekt typu `SMap` reprezentujúci konkrétne zobrazenie webovej stránky mapy.cz. Zobrazenie mapy je vytvárané nad HTML objektom typu `<div>`, ktorého id je predané ako argument pri inicializácii objektu triedy `SMap`. Mimo vrstiev môžu byť pridávané aj objekty typu `SMap.Control` umožňujúce modifikáciu ovládnia a interekcie s mapou, napr. pridanie možnosti posunu mapy pomocou myši, a pod.. Napísaný kód pre tvorbu mapy, pridanie ovládacích prvkov a vytvorenie a populáciu vrstvy v tejto práci vyzerá nasledovne:

```

$("#mapa").ready(function () {
    var center = SMap.Coords.fromWGS84(16.59238, 49.231754);
    m = new SMap(JAK.gel("mapa"), center, 17);
    m.addDefaultLayer(SMap.DEF_BASE).enable();
    m.addDefaultControls();
    var sync = new SMap.Control.Sync({bottomSpace:0});
    m.addControl(sync);
    var mouse = new SMap.Control.Mouse(SMap.MOUSE_PAN |
        SMap.MOUSE_WHEEL | SMap.MOUSE_ZOOM);
    m.addControl(mouse);

    layer = new SMap.Layer.Marker('currPos');
    m.addLayer(layer);
    layer.enable();

    let options = {}
    marker = new SMap.Marker(center, 'latestPos', options)
    layer.addMarker(marker)
})

```

post_data

Funkcia `post_data` spracováva dáta zaslané na URL adresu pre webovú aplikáciu FITNav s relatívnou cestou `/post_data`. Prijaté dáta sú spracované do reťazca, v ktorom sú jednotlivé hodnoty prijatého súboru JSON delimitované pomocou znaku „_“ a následne je tento reťazec uložený do pamäťovej databázy (in-memory database) vytvárajenej a obsluhovanej pomocou softvéru Redis [25]. Vytvorené reťazce sú ukladané do premenných typu *Redis List* implementované ako lineárny zoznam, pričom každý lineárny zoznam reprezentuje dáta práve jedného užívateľa. Pre vkladanie je využívaná metóda `RPUSH` s časovou komplexitou $\mathcal{O}(1)$, ktorá vloží reťazec na koniec zoznamu. Pri vkladaní je takisto využívaná metóda `EXPIRE`, ktorá nastaví TTL (Time To Live) pre daný zoznam na jednu hodinu. Teda pokiaľ dáta pre daného užívateľa nie sú aktualizované dlhšie ako hodinu, dáta sú vylúčené z databázy a je uvoľnená pamäť, ktorú zaberali. Pre správu tejto dočasnej databázy pre užívateľské dáta bola vybraná služba Redis z dôvodu malého množstva priestorových a časových zdrojov potrebných pre udržiavanie, upravovanie a získavanie uskladnených dát. Navyše podstatnou výhodou tohoto softvéru je jeho časté využitie pri nasadeniach webových aplikácií. Vďaka tomuto bol jednoducho integrovateľný do frameworku Flask pomocou existujúceho balíčku *flask-redis* [20]. Jednou nevýhodou pri využívaní databázy Redis je nízky počet podporovaných operačných systémov. Konkrétne podporované operačné systémy sú: Ubuntu, RHEL/CentOS 6, RHEL/CentOS 7, Oracle Linux 6, Oracle Linux 7 a Amazon Linux. Toto obmedzenie je riešiteľné pre operačné systémy Windows podporujúce WSL (Windows Sub-system for Linux) – toto riešenie bolo využité v tejto práci. Ďalšou populárnou alternatívou je hostenie Redis databázy v cloudovej platforme ako napr. AWS, Azure alebo Redis Enterprise Cloud.

get_data

Funkcia `get_data` spracováva HTTP požiadavky typu GET zaslané na URL adresu pre webovu aplikáciu FITNav s relatívnou cestou `/get_data/<id>`, kde `<id>` predstavuje UUID užívateľa ktorého dáta sú požadované. Ako odpoveď je zasielaná modifikovaná forma XML formátu nazývana GPX, využívaná pre výmenu GPS dát medzi softvérovými aplikáciami. Obsahom GPX súboru je popis trasy prejdenej užívateľom, pričom trasa je zoradený zoznam spojených pozičných dát. GPX súbor v tejto práci je generovaný pomocou balíka *gpx-py*. Príklad vygenerovaného GPX súboru:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<gpx xmlns="http://www.topografix.com/GPX/1/1"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.topografix.com/GPX/1/1
    http://www.topografix.com/GPX/1/1/gpx.xsd"
  version="1.1" creator="gpx.py -- https://github.com/tkrajina/gpxpy">
  <trk>
    <trkseg>
      <trkpt lat="49.224856085" lon="16.582543346">
        <time>2021-05-16T23:40:47+0100</time>
      </trkpt>
      <trkpt lat="49.224856129" lon="16.582543311">
        <time>2021-05-16T23:40:48+0100</time>
      </trkpt>
    </trkseg>
  </trk>
</gpx>
```

Uzol `<gpx>` obsahuje informácie o použitom type GPX schématu, verzii a o tvorcovi GPX súboru. Nasledovne pomocou uzlu `<trk>` a jeho dcérskych uzlov `<trkseg>` a `<trkpt>` je definovaná prejdená trasa. Uzol `<trk>` obsahuje jednu zobrazovanú trasu, pričom `<trkseg>` je časť danej trasy a uzly `<trkpt>` definujú informácie o danom bode ako jeho zemepisnú šírku, zemepisnú výšku a čas merania. Dáta obsahované v tomto súbore sú extrahované z Redis databázy pomocou metódy `LRANGE` s definovaným rozsahom nula až mínus jedna. Táto metóda vráti celý obsah lineárneho zoznamu indentifikovaného pomocou poskytnutého UUID z požiadavky GET. Časová komplexita pre získanie dát z databázy je $\mathcal{O}(n)$, pričom n je počet záznamov v zozname.

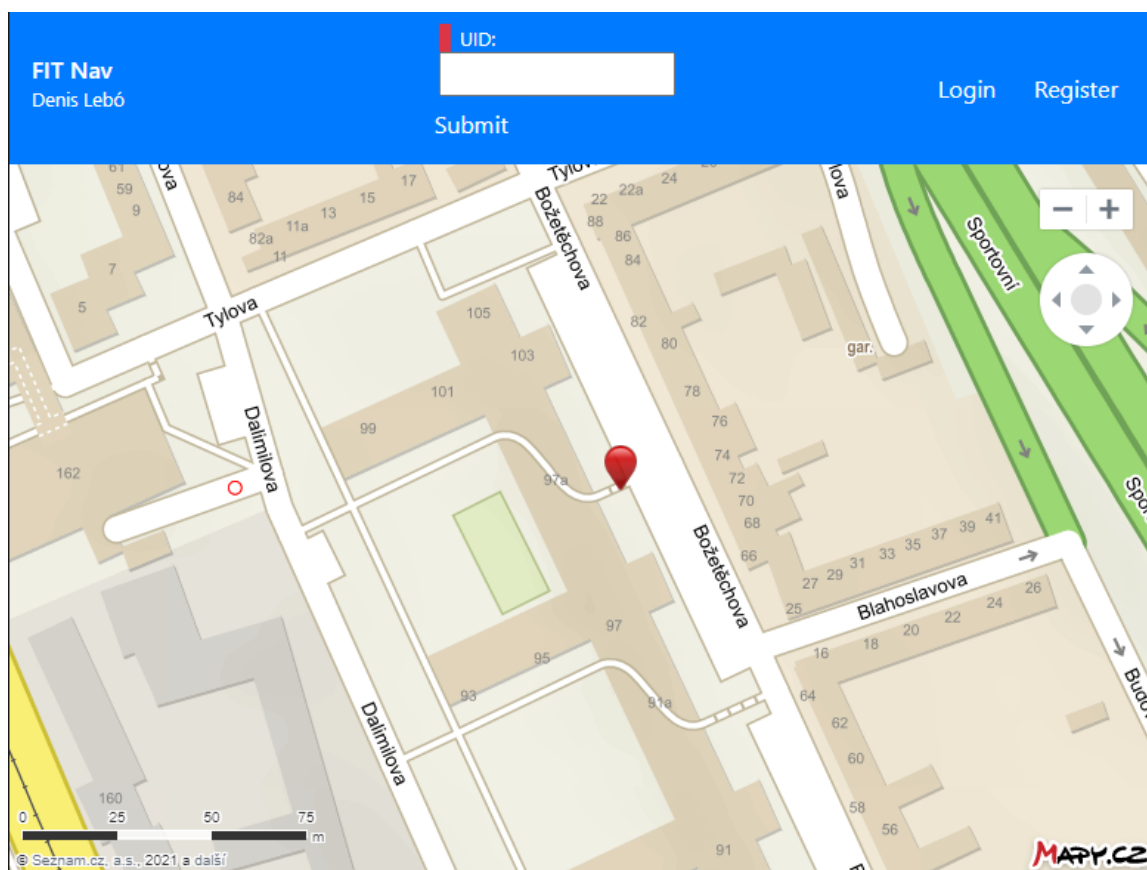
Hostenie aplikácie FITNav

Prerekvizita k hosteniu webovej aplikácie FITNav je prekladač jazyku Python verzie aspoň 3.9 (použitá verzia 3.9.1) a takisto nainštalovaný správca balíkov *pip* (použitá verzia 21.0.1) pre balíky jazyku python. Pre nainštalovanie potrebných balíkov je potrebné použiť príkaz:

```
pip install -r requirements.txt
```

Následne je nutné spustiť instanciu databázy Redis. Pokiaľ je instancia hostovaná v cloude, je potrebné prenastaviť premennú `REDIS_URL` v súbore **config.py** na URL poskytnutú hostiteľom služby. Po spustení instancie Redis je možné spustiť aplikáciu FITNav príkazom:

```
py .\waitress_server.py
```



Obr. 3.5: Spustená webová aplikácia FITNav

Toto zabezpečí hostenie serveru pomocou WSGI (web-server gateway interface) aplikácie *waitress* na lokálnej adrese s portom 80 (port http). Následne je možné pristúpiť k aplikácii FITNav pomocou URL adresy <http://127.0.0.1>. Ukážku spustenej webovej aplikácie je možné vidieť na obrázku 3.5.

Kapitola 4

Testovanie

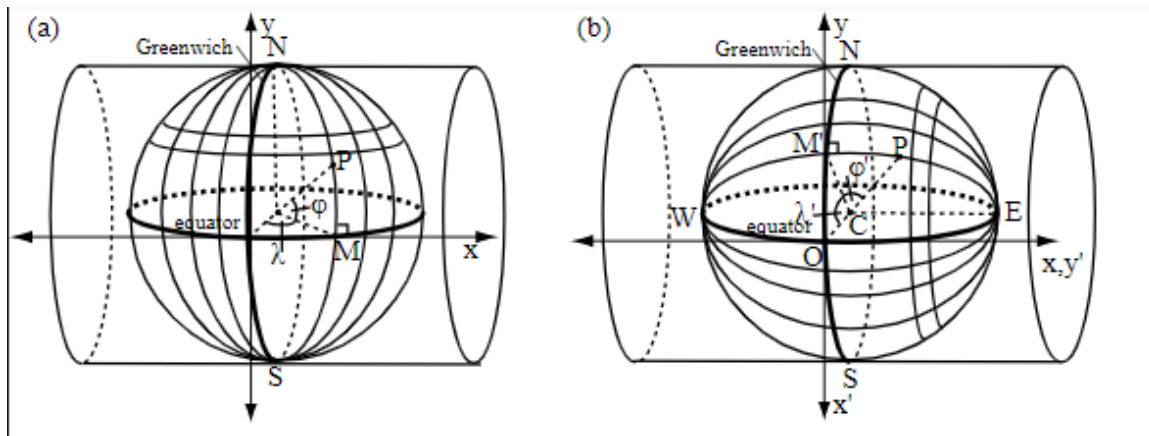
Pre overenie užitočnosti a funkčnosti práce, ktorá bola vykonaná v spojení s GNSS systémami bolo uskutočnených niekoľko meraní. Tieto merania sa zameriavali na testovanie prijímačov Reach Module pod rôznymi podmienkami s použitím technológií spomínaných v kapitole 2. Pre vyhodnocovanie výsledkov sa používali záznamy o získanej polohe daného prijímača vo formáte LLH (Latitude/Longitude/Height).

Tento formát poskytuje informácie o čase, v ktorom bolo meranie vykonané, o zaznamenananej zemepisnej šírke, zemepisnej výške a nadmorskej výške. Ďalej sú uvádzané aj informácie o počte viditeľných družíc a o stave premennej *solution status* opísanej v kapitole 3.2. Sú tu takisto uvedené aj informácie o smerodajnej odchýlke pre uvádzané súradnice. Ako posledná hodnota je uvádzaný pomer používaný pre rozhodnutie medzi stavmi *Float* a *Fixed* pri používaní RTK korekcií.

Tieto záznamy boli zaznamenávané pomocou prijímača Reach Module a po ukončení merania boli vytvorené dáta stiahnuté a vizualizované pomocou programu vytvoreného v jazyku Python za pomoci balíkov *matplotlib* a *numpy*. Pre počiatočné spracovanie dát boli hodnoty formátu LLH upravené na formát CSV (comma-separated values), teda pre delimitáciu jednotlivých hodnôt bol použitý znak „,“ pričom jednotlivé záznamy boli oddelené znakom pre nový riadok. Tento prevod bol vykonaný za účelom zjednodušenia procesu pre importovanie dát.

Následne boli získané súradnice prevedené zo súradníc, určených pomocou zemepisnej šírky a výšky geodetického štandardu WSG84 (World Geodetic Standard) na súradnice podľa systému súradníc UTM (Univerzálny transverzálny Mercatorov systém súradníc). Spôsob určovania súradníc UTM je podstatne odlišný od súradníc určených zemepisnou šírkou a dĺžkou podľa referenčného elipsoidu. UTM spočíva vo využívaní lokálnych zobrazení zemského povrchu, získaných z priečného Mercatorovho zobrazenia. Priečne Mercatorove zobrazenie je využívané pre zobrazenie zaokrúhlej plochy zemského povrchu na plochý povrch. V tomto prípade povrch vnútornej steny dutého valca s priemerom rovným priemeru zobrazovaného gule teda priemeru Zeme. Pri takomto zobrazení vzdialenosti bodov ďaleko od referenčného nultého poludníka, teda kružnice, ktorá sa na celej svojej dĺžke dotýka vnútornej steny valca, budú drasticky skreslené a nepresné, avšak body blízko prípadne na nultom poludníku, budú zobrazené iba s malou alebo žiadnou mierou skreslenia. Obrázok 4.1 graficky znázorňuje princíp tohto zobrazenia.

Súradnicový systém UTM využíva tejto vlastnosti na rozdelenie zemského povrchu do 60tich rôznych referenčných zón a ich projekcií. Toto rozdelenie je možné vidieť na obrázku 4.2. Typická šírka jednej UTM zóny je 6° zemepisnej šírky s niekoľkými výnimkami ako napríklad pre zónu 32N viditeľnej na obrázku 4.2. Súradnica v systéme UTM je de-



Obr. 4.1: Princíp transverzálneho Mercatorovho zobrazenia [35]

finovaná párom hodnôt Northing a Easting, teda ako vzdialenosť od referenčného bodu (0,0) na ose X a ose Y určenej v metroch. Teda využitím tohoto súradnicového systému je možné jednoducho vypočítať a zobraziť chyby pri určení pozície na osiach X a Y alebo ďalšie podstatné parametre ako napríklad veľkosť smerodajnej odchýlky v metroch. Stredný poludník každej zóny má vždy Easting súradnicu 500 000. Teda všetky body so súradnicami menšími ako 500 000 sa nachádzajú na západ od stredného poludníku zóny a všetky body so súradnicami väčšími ako 500 000 sa nachádzajú na východ od tohoto poludníku. Body s hodnotou Northing 0 sa nachádzajú pozdĺž rovníku Zeme. Hodnoty Northing stúpajú v oboch smeroch od rovníku a teda mimo čísla zóny je potrebné uvádzať aj písmeno „N“ alebo „S“ pre naznačenie severnej alebo južnej pologule.

Prevod do súradnicového systému UTM bol vykonaný za pomoci python balíčku *utm* [2]. Po tomto prevode je možné spracovať dáta pre prehľadnú vizualizáciu získaných meraní. Toto bolo docieľené vypočítaním priemernej pozície zo všetkých hodnôt daného merania a znázornením každej zaznamenatej polohy ako jej rozdiel od priemernej polohy v ose X a ose Y. Tieto výpočty boli zavedené nasledujúcim spôsobom:

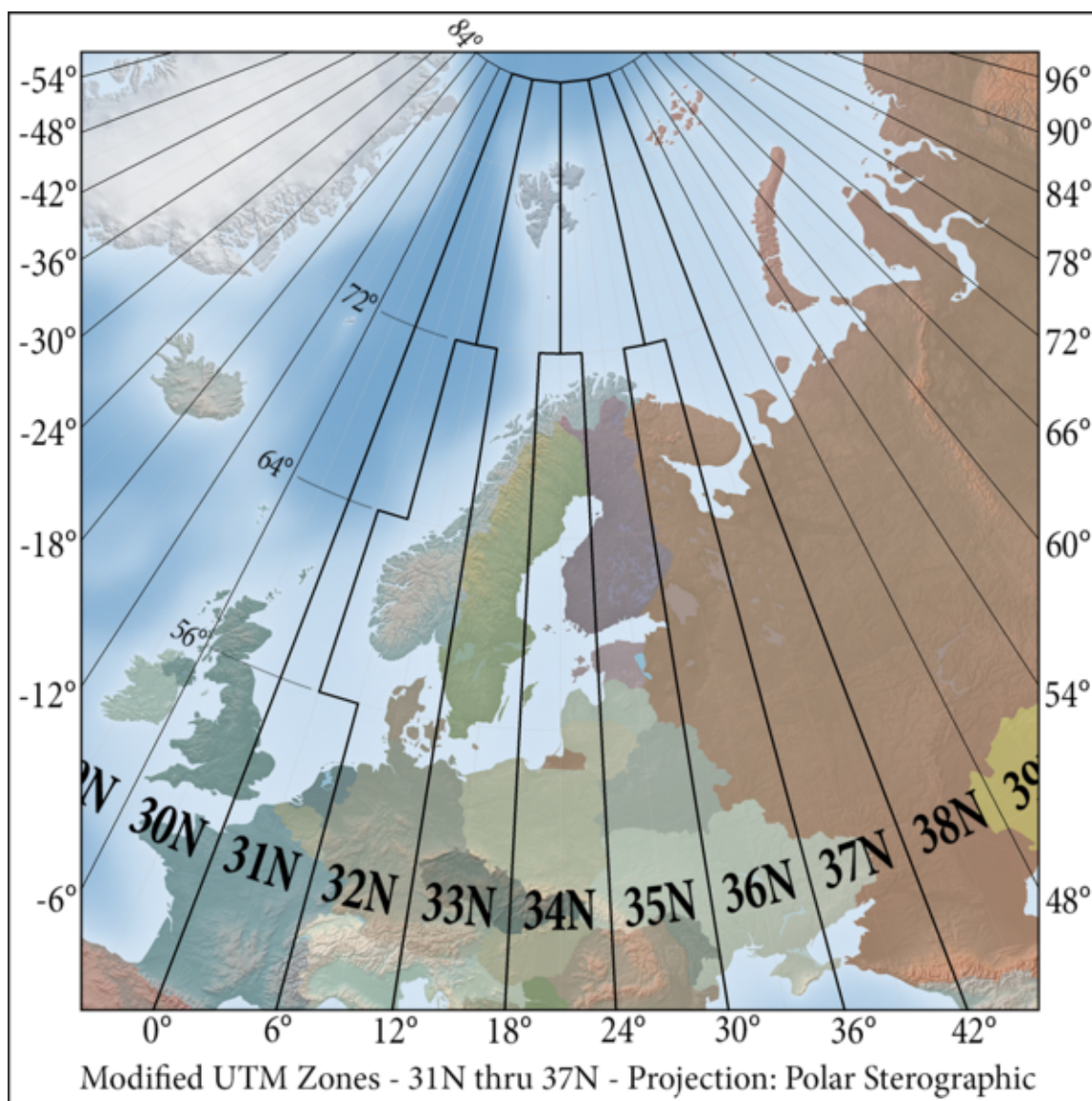
$$X_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n N_i \quad (4.1)$$

$$Y_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_i$$

$$X_i = N_i - X_0 \quad (4.2)$$

$$Y_i = E_i - Y_0$$

kde X_0 a Y_0 značia priemernú hodnotu Northing a Easting pre používaný súbor dát, N_i je hodnota súradnice Northing pre daný bod, E_i je hodnota súradnice Easting pre daný bod a hodnoty X_i a Y_i značia hodnoty pre daný bod na grafe používanom pre vizualizáciu.



Obr. 4.2: Rozdelenie UTM zón v Európe [37]

4.1 Vplyv vzdialenosti

Počiatkové experimenty sa zameriavali na testovanie vplyvu vzdialenosti medzi referenčným a užívateľským prijímačom. Výsledky týchto meraní sú zobrazené na grafoch 4.5, 4.4, 4.7 a 4.6. Pozície referenčného prijímača pre tieto RTK merania boli určené pomocou metódy „Average Single“, kedy pozícia prijímača je vypočítaná ako priemerná pozícia všetkých meraní pre prijímač bez RTK korekcií. V prípade, že je dostupný dostatočne blízky referenčný prijímač alebo je referenčný prijímač umiestnený na zmapovaný geodetický referenčný bod je možné pre presnejšie určenie polohy využiť metódy „RTK FIX Position“ alebo „Manual“. Tieto požiadavky nebolo možné splniť v lokalite merania a teda musela byť využitá nepresnejšia metóda „Average Single“, ktorého presnosť je podľa špecifikácii firmy Emlid ~2.5m [7]. V dôsledku nedostupnosti RTK korekcií môžu byť merania 4.4 a 4.5 použité ako výsledky meraní pre GNSS prijímače v tzv. *Standalone* móde.

Medzi meraniami zo dňa 3. mája a 9. mája, bolo z externých dôvodov nutné premiestniť referenčnú stanicu. Tento presun mal pozitívny dopad na presnosť získanej pozície ako je možné vidieť pri porovnaní grafov 4.4 a 4.5. Pri meraní počas dňa 9. mája bola referenčná stanica umiestnená na bode s dobrým výhľadom a ďaleko od okolitých prekážok, pričom anténa bola umiestnená na vodivej ploche o veľkosti aspon 7x7cm. Pri meraní počas dňa 3. mája bola referenčná stanica takisto umiestnená na bode s dobrým výhľadom a anténa bola umiestnená na rovnakej vodivej ploche avšak v blízkosti sa nachádzali viaceré objekty, pri ktorých mohlo dochádzať k zvýšeniu chyby spôsobenej odrazom signálu tzv. *multipath* chyby. Bohužiaľ, veľkosť chyby je v niektorých bodoch merania nadpriemerne veľká a teda je možné, že presnosť meraní v grafe 4.4 boli v jednom momente ovplyvnené neznámymi vonkajšími faktormy. Pri meraní referenčného prijímača zo dňa 9. mája je viditeľná presnosť ± 2.5 m v oboch osiach od priemernej pozície, ktorá zodpovedá udávanej presnosti Average Single metódy. Je však nutné podotknúť, že následkom požívania súradnicového systému UTM je vzdialenosť od pozície braná bez ohľadu na rozdiel výšok.

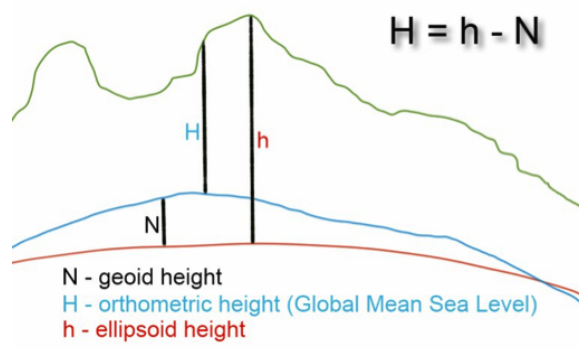
3. máj – referenčná stanica

Smerodajné odchýlky pre súradnice Northing a Easting zo dňa 3. mája sú $\sigma_N \approx 2.751$ m a $\sigma_E \approx 2.23$ m pričom pozícia získaná vytvorením aritmetického priemeru súradníc počas celej dĺžky merania zo dňa 3. mája je:

- zemepisná šírka: $\tilde{x}_{lat} = 47.977080126^\circ$,
- zemepisná dĺžka: $\tilde{x}_{long} = 18.148731631^\circ$,
- a výška: $\tilde{x}_{height} = 160.571$ m n. m..

Táto pozícia je odlišná od pozície získanej metódou Average Single, pre ktorú sú získané súradnice:

- zemepisná šírka: $lat \approx 47.977084805^\circ$
- zemepisná dĺžka: $long \approx 18.148713876^\circ$
- a výška: $height \approx 160.186$ m n. m..



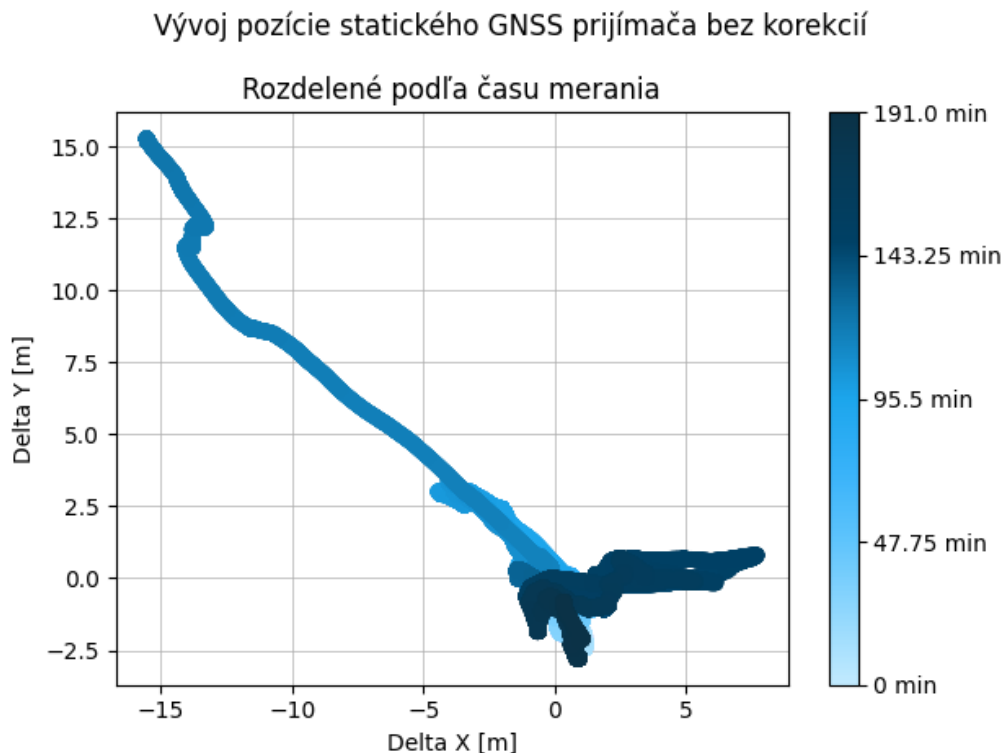
Obr. 4.3: Znázornenie rozdielu medzi nadmorskou výškou(H) a elipsoidnou výškou(h) [30]

Je teda možné zistiť, že získané pozície sú od seba vzdialené o 1.54 m. Pre zobrazení výšku v týchto bodoch je ale nutné podotknúť, že GNSS zariadenia, ako je to aj v prípade prijímačov Reach Module, zobrazujú elipsoidnú výšku teda výšku od referenčného elipsoidu Zeme. Táto výška je iná od bežne používanej výšky nad morom. Znázornenie tohoto problému je zobrazené na obrázku 4.3. Pre získanie nadmorskej výšky z elipsoidnej výšky bol využitý nástroj od organizácie UNAVCO [29]. Nadmorská výška pre polohu nameranú pomocou metódy Average Single je 116.5 m n. m., ktorá približne zodpovedá očakávanej nadmorskej výške na mieste 113 m n. m., podľa databázi ZBGID [14], po započítaní lokálneho vyvýšenia v tomto bode (položenie na streche) vo výške zhruba 3 m. Hodnota získaná pomocou priemeru všetkých hodnôt sa nachádza v nadmorskej výške 116.9 m n. m.. Celkovo je možné zhodnotiť že merania, napriek nadmerne vysokým odchýlkam v istých bodoch, splňujú očakávanú presnosť.

9. máj – referenčná stanica

Smerodajné odchýlky pre súradnice Northing a Easting referenčnej stanice zo dňa 9. mája sú $\sigma_N \approx 1.131$ m a $\sigma_E \approx 1.028$ m. Je možné vidieť vplyv lepšieho umiestnenia referenčnej stanice na získanú presnosť zavedenej stanice. Pozícia získaná spriemerovaním všetkých hodnôt daného merania je:

- zemepisná šírka: $\tilde{x}_{lat} = 47.977217528^\circ$,
- zemepisná dĺžka: $\tilde{x}_{long} = 18.148611895^\circ$,
- a výška: $\tilde{x}_{height} = 157.538$ m n. m..

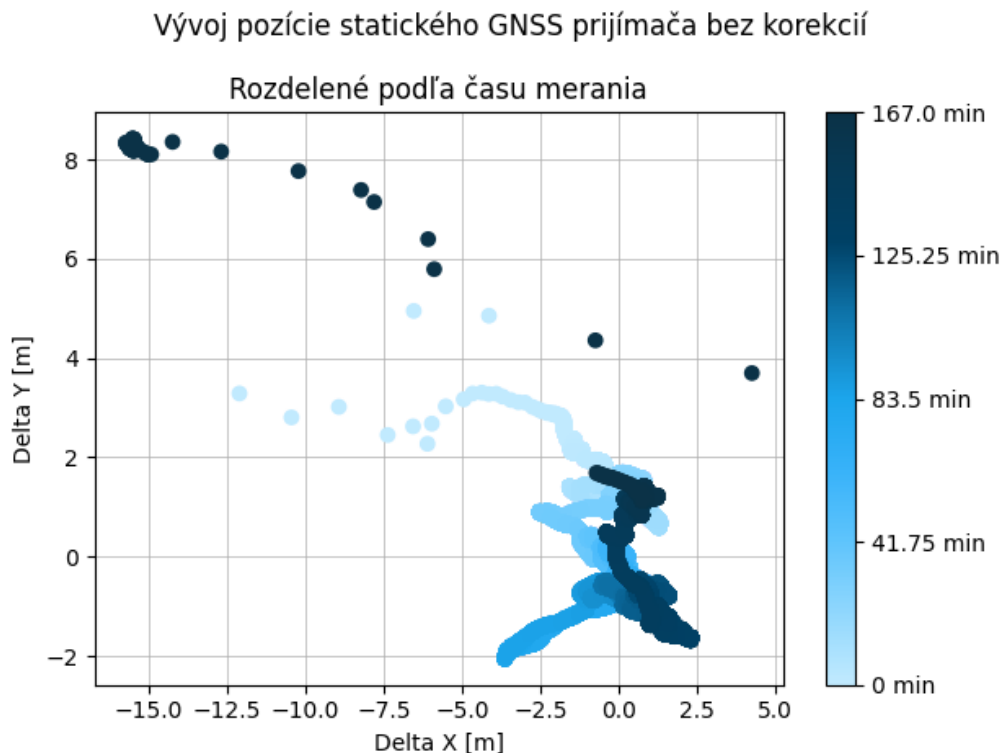


Obr. 4.4: Vyhodnotenie meraní referenčného prijímača zo dňa 3. máj 2020 - Nové Zámky

Pričom súradnice získané pomocou metódy Average Single sú:

- zemepisná šírka: $lat = 47.9772170884^\circ$,
- zemepisná dĺžka: $long = 18.1486300405^\circ$,
- a výška: $height = 154.587$ m n. m..

Získané pozície sú od seba vzdialené o 1.43 m teda chyba medzi pozíciou získanou dlhodobým meraním a pozíciou získanou Average Single splňuje očakávanú mieru presnosti udávanú v špecifikáciách firmy Emlid. Avšak pri porovnaní získaných výšok v oboch výsledkoch je možné vidieť zníženie elipsoidnej výšky. Tento fakt nie je zhodný s faktom, že pri presune referenčnej stanice došlo k zvýšeniu lokácie prijímača oproti 3. máju o 1 poschodie, teda zhruba 3-4 m. Hodnota nadmorskej výšky získaná spriemerovaním hodnôt zo dňa 9. mája o veľkosti 113.856 m n. m., ktorá je v tomto mieste rovná výške 113 m n. m. podľa databázy ZBGIS [14]. Po započítaní lokálneho vyvýšenia (strecha na 2. poschodí) zhruba 6-8 m bola očakávaná výška odhadovaná na ≈ 119 -121 m n. m. Nie je známe z akého dôvodu došlo k tejto podstatnej odchýlke od odhadovanej výšky.



Obr. 4.5: Vyhodnotenie meraní referenčného prijímača zo dňa 9. mája 2020 - Nové Zámky

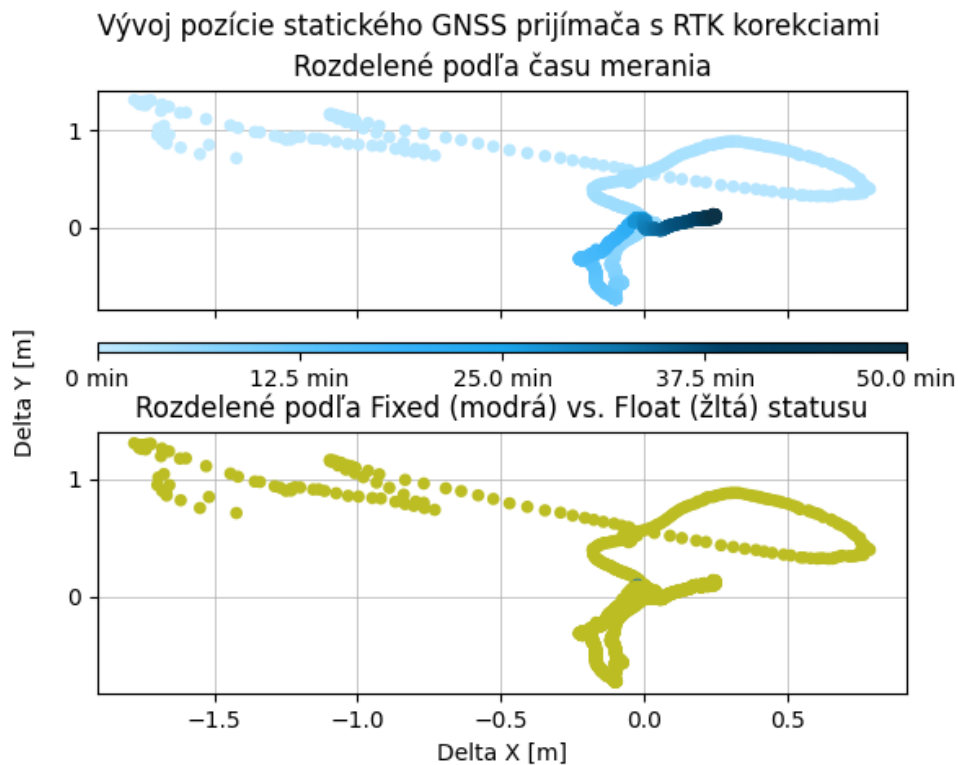
3. máj – užívateľský prijímač

Užívateľský prijímač bol umiestnený vo vzdialenosti 20 km od referenčného prijímača s dobrým výhľadom, s anténou umiestnenou na vodivej ploche aspoň 7x7cm. Napriek týmto podmienkam je však možné vidieť, že po nadmernom presiahnutí maximálnej odporúčanej baseline vzdialenosti 10 km [8] nebolo možné počas celej doby dosiahnuť stav „Fixed“ znamenajúci, že problém integer ambiguity bol vyriešený a pozícia užívateľského prijímača je priamo závislá od referenčného prijímača. Napriek tomuto faktoru bolo možné doceliť presnosť lepšiu ako 1m. Smerodajné odchýlky pre súradnice Northing a Easting sú: $\sigma_N \approx 0.274$ m a $\sigma_E \approx 0.322$ m. Je teda možné vidieť výhodu RTK korekcií aj pre väčšie vzdialenosti. Pozícia získaná pomocou spriemerovania meraní je nasledovná:

- zemepisná šírka: $\tilde{x}_{lat} = 48.020273369^\circ$,
- zemepisná dĺžka: $\tilde{x}_{long} = 18.408511347^\circ$,
- a výška: $\tilde{x}_{height} = 229.771$ m n. m..

Nadmorská výška v tomto bode je rovná 187 m n. m., teda odlišná o približne 1m od prevedenej elipsoidnej výšky 186.015 m n. m..

Na grafe 4.6 je možné vidieť stabilizáciu polohy blízko priemernej polohy po počiatočných pár minútach merania. K tomuto efektu pravdepodobne dochádza následkom postupného vylepšovania riešenia integer ambiguity problému, keďže podobný efekt je možné vidieť aj pri meraniach zo dňa 9. mája na grafe 4.7.



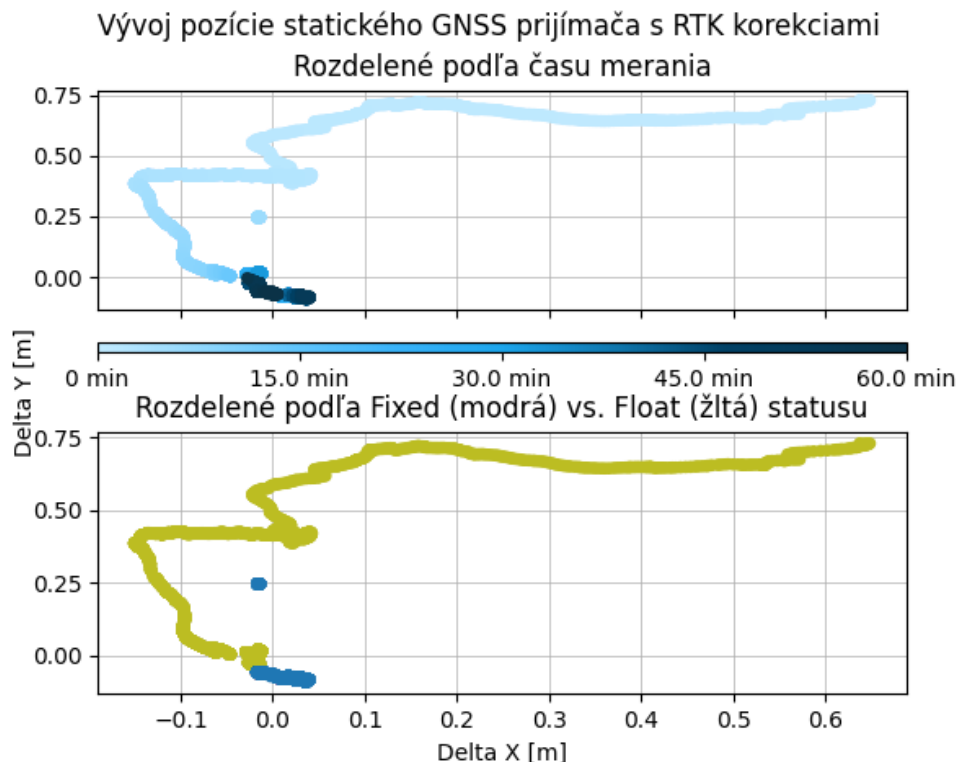
Obr. 4.6: Vyhodnotenie meraní užívateľského prijímača zo dňa 3. mája 2020 - Kolta

9. máj – užívateľský prijímač

Užívateľský prijímač bol umiestnený vo veľmi blízkej baseline vzdialenosti 14 m umiestnený s dobrým výhľadom na vodivej podložke aspoň 7x7cm. Na rozdiel od merania zo dňa 3. mája, bolo po počiatočnej dobe stabilizácie o dĺžke zhruba 8 minút, možné vyriešiť problém integer ambiguita a stav pre veľkú časť meraní bola „Fixed“, ako je možné vidieť na grafe 4.7. Tento efekt sa priamo odráža na kvalite získaných súradníc, pre ktoré sú smerodajné odchýlky: $\sigma_N \approx 0.063$ m a $\sigma_E \approx 0.158$ m. Pri zmenšenej baseline je teda možné vidieť podstatný nárast presnosti. Tieto výsledky potvrdzujú očakávané správanie RTK technológie, kedy chyby ΔT a ΔI z rovnice 2.17 narastajú úmerne so vzdialenosťou medzi prijímačmi, keďže signál postihuje postupne narastajúca rozdielna chyba T a I . Pozícia získaná spriemerovaním všetkých meraní zo dňa 9. mája:

- zemepisná šírka: $\tilde{x}_{lat} = 47.977338437^\circ$,
- zemepisná dĺžka: $\tilde{x}_{long} = 18.148592598^\circ$,
- a výška: $\tilde{x}_{height} = 150.741$ mn.m..

Chyba pri zameraní výšky referenčného prijímača mala avšak podstatný efekt na výšku určenú prijímačom s rozdielom medzi očakávanou a získanou o veľkosti 6 m teda približne zhodnou s očakávanou odchýlkou 6-8 m referenčného prijímača.

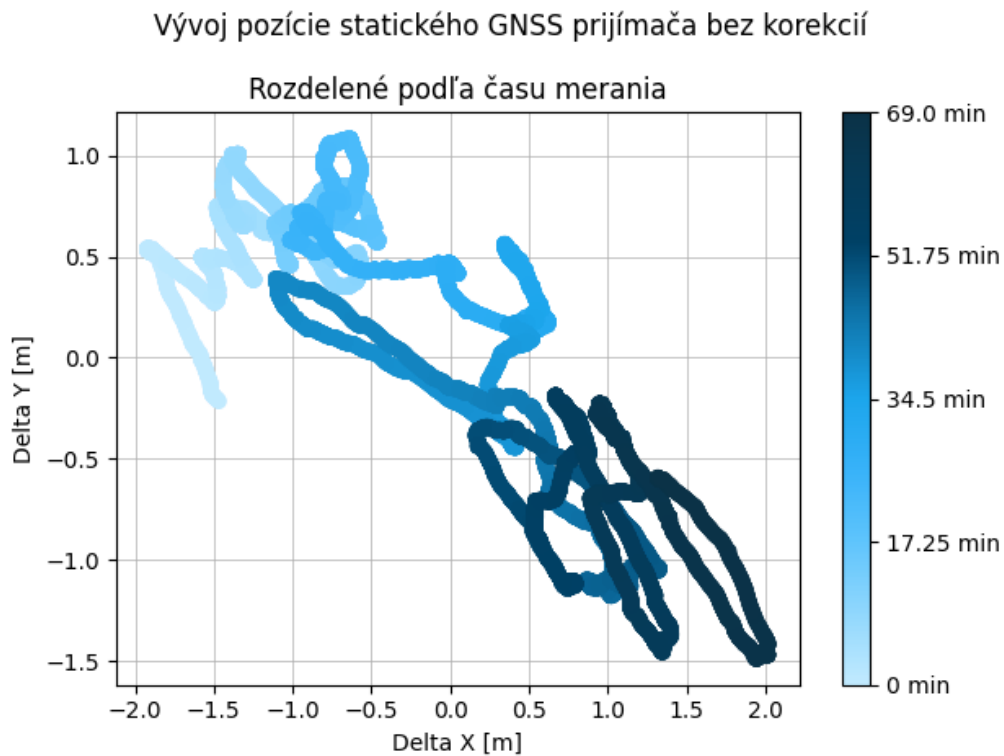


Obr. 4.7: Vyhodnotenie meraní užívateľského prijímača zo dňa 9. mája 2020 - Nové Zámky

4.2 Porovnanie RTK vs. Standalone

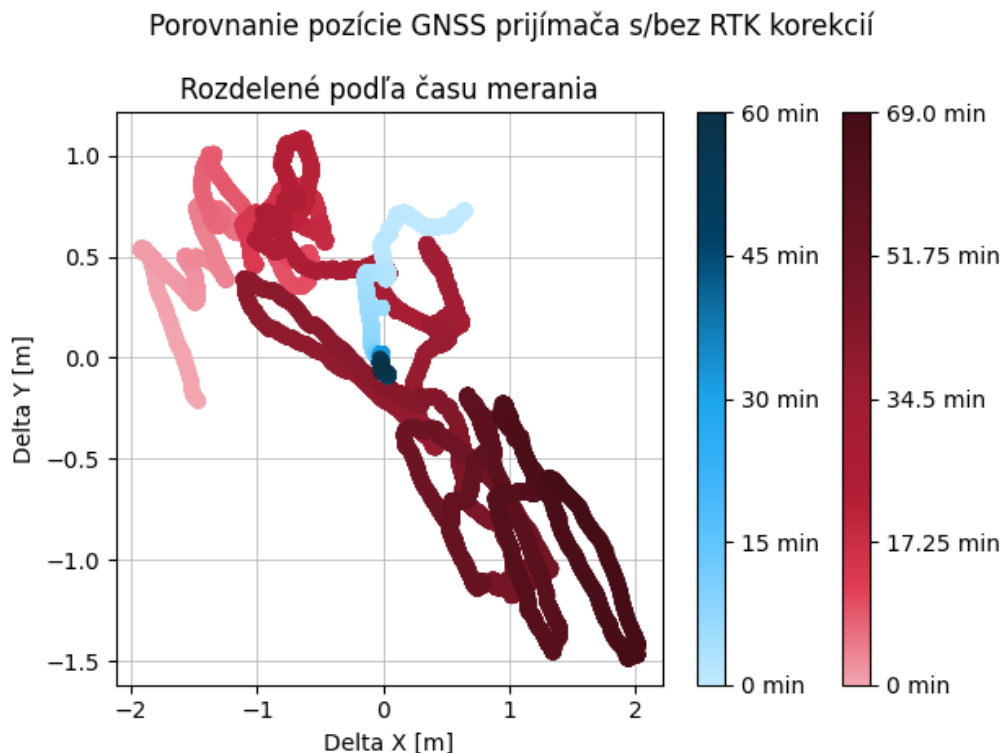
Pre porovnanie oboch technológií boli využité RTK merania z 9. mája. Pre elimináciu čo najväčšieho množstva externých faktorov bol použitý prijímač z meraní vizualizovaných grafom 4.7. Jeho pozícia medzi meraniami bola nezmenená a merania boli vykonané s čo najmenšou prestávkou. Na grafe 4.8 je možné vidieť vizualizáciu dát z prijímača bez využitia RTK korekcií. Smerodajné odchýlky pre súradnice Northing a Easting sú: $\sigma_N = 0.943$ m a $\sigma_E = 0.68$ m je možné teda určiť, že umiestenie a okolité podmienky pre tento prijímač boli doposiaľ najlepšie. Tento fakt sa odráža aj na veľmi dobrej presnosti dosiahnutej prijímačom v režime RTK. Pri porovnaní grafu je avšak možné vidieť, že primárny zdroj nepresnosti pre merania RTK bola počiatočná doba riešenia problému intiger ambiguity. Po uplynutí istej doby je určená pozícia takmer explicitne koncentrovaná okolo bodu (0,0). Je takisto možné usúdiť, že aj napriek nízkym hodnotám smerodajných odchýlok pre standalone GNSS prijímač, bola pozícia určená pomocou technológie RTK konzistentne presnejšia a menej náchylná pre nevhodné určenie polohy. Vizualizáciu porovnania pozícií určených prijímačom v standalone a RTK režime je znázornená v grafe 4.9. Pozícia získaná pomocou spriemerovania pozorovaní GNSS prijímača v režime standalone:

- zemepisná šírka: $\tilde{x}_{lat} = 47.977353555^\circ$,
- zemepisná dĺžka: $\tilde{x}_{long} = 18.148578858^\circ$,
- a výška: $\tilde{x}_{height} = 158.343$ m n. m..



Obr. 4.8: Vyhodnotenie meraní samostatného prijímača zo dňa 9. mája 2020 - Nové Zámky

Je nutné podotknúť, že bod (0,0) v grafe 4.9 nemá rovnaké súradnice pre obe merania. Táto vizualizácia slúži iba pre porovnanie rozptylov získaných bodov. V skutočnosti sú od seba priemerné pozície oboch meraní vzdialené o 2m. Tento rozdiel v získaných polohách môže pochádzať z nepresne určenej pozície referenčnej stanice, nedostatočnej dĺžky pozorovania alebo rôznymi inými externými faktormi.

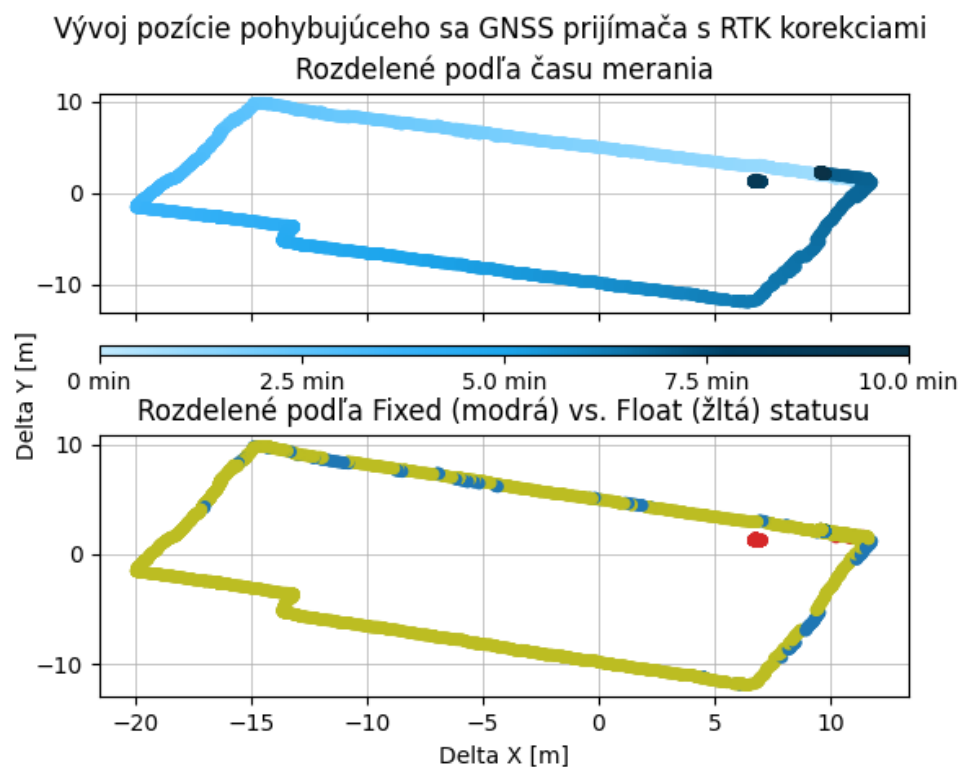


Obr. 4.9: Porovnanie meraní z grafov 4.7(modrá) a 4.8(červená)

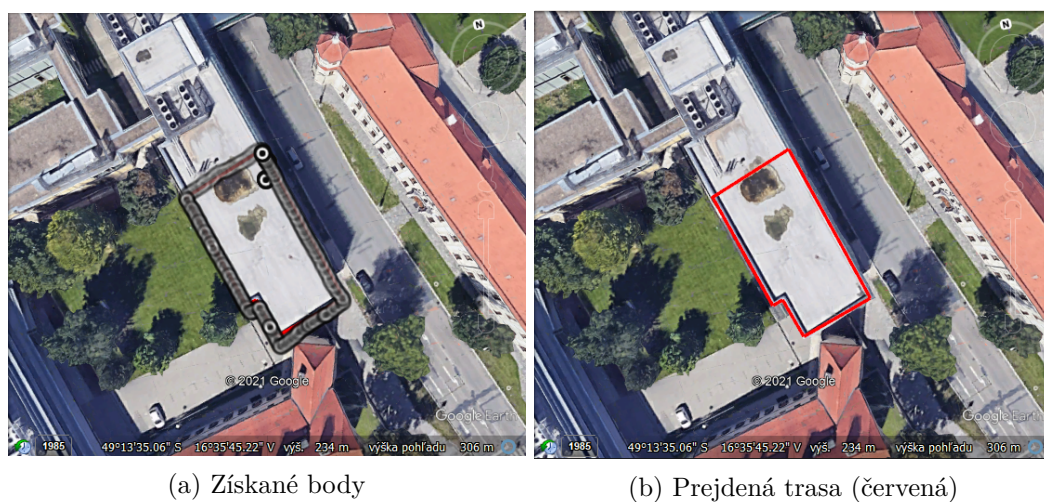
4.3 Mobilný prijímač s RTK korekciami

Na grafe 4.10 a obrázku 4.11 sú zobrazené namerané dáta pre pohybujúci sa GNSS prijímač s využitím RTK korekcií. Prijímač bol vedený pozdĺž vnútornej hrany časti strechy budovy L fakulty Informatičných Technológií na Božetechovej ulici v Brne. Prejdená trasa je zobrazená na obrázku 4.11b a pozície získané z merania sú zobrazené pomocou aplikácie Google Earth Pro¹ na obrázku 4.11a. Anténa referenčného prijímača nebola umiestená na odporúčanom vodivom povrchu z dôvodu nedostupnosti prenosného vodivého povrchu. Prekvapivo, tento fakt nemal vysoký dopad na presnosť získanej pozície a ako je možné vidieť pri porovnaní získanej trasy oproti reálnej, bola dosiahnutá pomerne vysoká presnosť meraní. Je nutné podotknúť, že jednopásmové prijímače, teda prijímače schopné spracovávania iba signálu L1, ako prijímač Reach Module sú podstatne náchylnejšie pre chyby spôsobené neadekvátnym umiestnením antény a teda je naďalej nutné poskytnúť dobrý výhľad bez väčšieho množstva okolitých prekážok ako napr. umiestnením antény na streche budovy.

¹<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html?hl=en-GB>



Obr. 4.10: Vyhodnotenie meraní užívateľského prijímača zo dňa 12. mája 2020 - Brno



Obr. 4.11: Vizualizácia dát z mobilného užívateľského prijímača – Brno

Kapitola 5

Záver

Prvotným cieľom tejto práce bolo zhrnutie problematiky GNSS so zameraním na technológiu DGPS. Záverom kapitoly 2.1 bol vzorec 2.11 charakterizujúci spôsob výpočtu pozície užívateľa za predpokladu znalosti dĺžky času cesty signálu od družice po prijímač.

V kapitole 2.2 boli zhrnuté charakteristiky GNSS konštelácií. Boli definované podstatné charakteristiky PRN kódov konštelácie GPS, ich význam, použitie a spôsob propagácie.

Bol zhrnutý aj význam nadstavby technológie DGPS a jej spôsob fungovania. Popísaná v kapitole 2.3 vzorcom 2.17 je výsledná rovnica definujúca spôsob určenia pozície užívateľa relatívne voči referenčnému prijímaču.

Ďalej bol definovaný rozdiel v technológiách RTK oproti DGPS a boli ustanovené dôvody pre zvýšenú presnosť. Na konci kapitoly 2.3 bol definovaný problém vznikajúci pri zavedení RTK obtiažnej definícií veľkosti počtu ubehnutých cyklov signálu počas jeho cesty.

V kapitole 2.4 boli zhrnuté vlastnosti protokolu NTRIP a jeho relevancia pri riešení problematiky tejto diplomovej práce. Takisto boli prebrané jednotlivé časti nutné pre správnu funkciu tohoto protokolu – ich funkcia, význam a zavedenie v reálnom svete.

Prieskum možných riešení pre implementáciu RTK komunikácie využitím internetu bol realizovaný v kapitole 3.1. Následne bola opísaná implementácia v kapitolách 3.2 a 3.3. Počítateľne v kapitole 3.2 bola opísaná implementácia programu splňujúceho funkciu NTRIPCaster programu – program SNIP. Nasledovne bol opísaný postup pre správne sprevádzkovanie a nastavenie prijímačov Reach Module. V úvode kapitoly 3.3 bola popísaná implementácia programu, ktorý má za úlohu získavať dáta z GNSS prijímača a posielať ich na webovú stránku pre vizualizáciu polohy – <http://fitnav.westeurope.cloudapp.azure.com/>. Následne bola spísaná implementácia webovej stránky, ktorá používa platformu mapy.cz pomocou Mapy API za účelom vizualizácie pozícií užívateľa.

V kapitole 4 sú zhrnuté testy zamerané primárne na testovanie presnosti bežnej technológie GNSS oproti presnosti zavedení s DGPS korekciami. Výsledky týchto meraní ukázali zvýšenú presnosť pre zavedenia s korekciami RTK. Pre merania GNSS systémov bez korekcií boli získané hodnoty smerodajných odchýlok pre pozíciu užívateľa na ose X $\sigma_{X1} = 2.751$ m, $\sigma_{X2} = 1.131$ m a $\sigma_{X3} = 0.943$ m a pre osu Y $\sigma_{Y1} = 2.23$ m, $\sigma_{Y2} = 1.028$ m a $\sigma_{Y3} = 0.683$ m. Výsledky merania 1 boli ovplyvnené horšími podmienkami okolia v blízkosti antény, čo je vidno v porovnaní s meraniami 2 a 3. Pri meraní GPS prijímačov s využitím korekcií referenčných staníc boli získané podstatne presnejšie pozície so smerodajnými odchýlkami v ose X $\sigma_{X4} = 0.274$ m a $\sigma_{X5} = 0.063$ m pričom odchýlky v ose Y sú $\sigma_{Y4} = 0.322$ m a $\sigma_{Y5} = 0.158$ m.

Literatúra

- [1] BAYER, M. *SQLAlchemy* [online]. [2008-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček SQLAlchemy pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/SQLAlchemy/>.
- [2] BIENIEK, T. *Utm* [online]. [2012-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček utm pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/utm/>.
- [3] *Ntrip - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* [online]. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), [1997-2021] [cit. 25-4-2021]. Dostupné z: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/about>.
- [4] *Ntrip - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* [online]. Dokumentácia, 1. vyd. V spolupráci s Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) a TU Dortmund. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), september 2004 [cit. 28-4-2021]. Dostupné z: https://igs.bkg.bund.de/root_ftp/NTRIP/documentation/NtripDocumentation.pdf.
- [5] COLLINS, E. *Passlib* [online]. [2008-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček passlib pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/passlib/>.
- [6] *What is GNSS?* [online]. European GNSS Agency, [2016-2021]. Revidováno 19.11.2020 [cit. 30-12-2020]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>.
- [7] *Placing the base* [online]. Dokumentácia. Emlid, [2014-2021] [cit. 7-5-2021]. Dostupné z: <https://docs.emlid.com/reach/tutorials/basics/placing-the-base>.
- [8] *Single-band VS Multi-band* [online]. Dokumentácia. Emlid, [2014-2021] [cit. 7-5-2021]. Dostupné z: <https://docs.emlid.com/reach/tutorials/basics/single-multi>.
- [9] *Using Reach as a standalone Linux computer* [online]. Dokumentácia. Emlid, [2015-2017] [cit. 16-5-2021]. Úryvok zastranej dokumentácie zmieňujúci fakt, že prímače Emlid budú zobrazované pod firmou Murata Manufacturing. Dostupné z: <https://github.com/emlid/reach-docs/blob/old-docs/docs/software-development.md>.
- [10] ENGE, P. K. a DIGGELEN, F. van. *GPS: An Introduction to Satellite Navigation, with an interactive Worldwide Laboratory using Smartphones* [online]. Stanford University, 2014 [cit. 30-12-2020]. Kurz organizovaný Stanford Center for Position, Navigation and Time v roku 2014. Zálaha pre tento kurz bola publikovaná na stránky youtube.com. Dostupné z: <https://scpnt.stanford.edu/research/current-research/gps-mooc>.

- [11] *Galileo's clocks* [online]. European Space Agency, [2016-2021] [cit. 30-12-2020]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks.
- [12] *Galileo navigation signals and frequencies* [online]. European Space Agency, 2005 [cit. 20-1-2021]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_navigation_signals_and_frequencies.
- [13] FRAZIER, M. *Flask-login* [online]. Udržiavané užívateľom doraemon. [2012-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček flask-login pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/flask-login/>.
- [14] *ZGBIS* [online]. Geodetický a kartografický ústav, [2015-2021] [cit. 16-5-2021]. Dostupné z: <https://zbgis.skgeodesy.sk/>.
- [15] GREWAL, M. S., ANDREWS, A. P. a BARTONE, C. G. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 3. vyd. John Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-52353-7.
- [16] LANGLEY, R. B. *Innovation: GLONASS — past, present and future* [online]. GPS World, 1. novembra 2017 [cit. 20-1-2021]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/innovation-glonass-past-present-and-future/>.
- [17] LAWRENCE, D., COBB, H. S., GUTT, G., O'CONNOR, M., REID, T. G. et al. *Innovation: Navigation from LEO* [online]. GPS World, 30. júna 2017 [cit. 30-12-2020]. Pôvodný článok je archivovaný s potrebou predplatného na stránke <http://digital.gpsworld.com/July2017#&pageSet=22>. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/innovation-navigation-from-leo/>.
- [18] LORD, D. *Flask-WTForms* [online]. 2016 [cit. 18-5-2021]. Balíček Flask-WTForms pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/Flask-WTForms/>.
- [19] *MapyAPI* [online]. Seznam.cz, [2006-2021] [cit. 18-5-2021]. API pre stránku <http://mapy.cz>. Dostupné z: <https://api.mapy.cz/>.
- [20] NAGY, B. *Flask-redis* [online]. [2013-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček flask-redis pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/flask-redis/>.
- [21] *How Does DGPS (Differential GPS) Work?* [online]. Racelogic, 2018. Revidováno 22. 8. 2018 [cit. 30-12-2020]. Dostupné z: [https://racelogic.support/01VB0X_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_Does_DGPS_\(Differential_GPS\)_Work%3F](https://racelogic.support/01VB0X_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_Does_DGPS_(Differential_GPS)_Work%3F).
- [22] *How does RTK (Real Time Kinetic) Work?* [online]. Racelogic, 2018. Revidováno 22. 1. 2018 [cit. 24-1-2021]. Dostupné z: [https://racelogic.support/01VB0X_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_does_RTK_\(Real_Time_Kinetic\)_Work%3F](https://racelogic.support/01VB0X_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_does_RTK_(Real_Time_Kinetic)_Work%3F).
- [23] RODRÍGUEZ, J. Ávila. *Galileo Signal Plan* [online]. European Space Agency: Navipedia, 2011. Revidováno 16. 3. 2020 [cit. 20-1-2021]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Galileo_Signal_Plan&oldid=14708.
- [24] RONACHER, A. *Flask-SQLAlchemy* [online]. [2010-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček Flask-SQLAlchemy pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/Flask-SQLAlchemy/>.

- [25] SANFILIPPO, S. *Redis* [online]. redislabs, [2013-2021] [cit. 18-5-2021]. Služba Redis. Dostupné z: <https://redis.io/>.
- [26] *WHAT IS SNIP?* [online]. SubCarrier Systems, [1993-2021] [cit. 22-1-2021]. Dostupné z: <https://www.use-snip.com/snip-overview/>.
- [27] SUBIRANA, J. S., ZORNOZA, J. J. a HERNANDEZ PAJARES, M. *GNSS signal* [online]. Navipedia, 2011. Revidováno 30. 5. 2014 [cit. 20-1-2021]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GNSS_signal&oldid=12967.
- [28] *A Guide To GPS Master Clocks* [online]. TimeTools, 20. septembra 2018 [cit. 31-12-2020]. Dostupné z: <https://timetoolsltd.com/master-clocks/a-guide-to-gps-master-clocks/>.
- [29] *Geoid Height Calculator* [online]. UNAVCO, [2001-2021] [cit. 16-5-2021]. Dostupné z: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/geoid-height-calculator/geoid-height-calculator.html>.
- [30] *Tutorial: The Geoid and Receiver Measurements* [online]. UNAVCO, [2001-2021] [cit. 16-5-2021]. Dostupné z: <https://www.unavco.org/education/resources/tutorials-and-handouts/tutorials/geoid-gps-receivers.html>.
- [31] *NAVSTAR GPS User Equipment: Introduction* [online]. September 1996 [cit. 2-1-2021]. Dostupné z: <https://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/gpsuser/gpsuser.pdf>.
- [32] WEBER, G., DETTMERING, D. a GEBHARD, H. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). In: SANSÒ, F., ed. *A Window on the Future of Geodesy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, s. 60–64. ISBN 978-3-540-27432-2.
- [33] *List of Galileo satellites* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021. Revidováno 30. 11. 2020 [cit. 30-12-2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites.
- [34] *Pseudorange* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021. Revidováno 26. 11. 2020 [cit. 30-12-2020]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorange>.
- [35] MERCATOR, P. *Transverse mercator graticules*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2010 [cit. 16-5-2021]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transverse_mercator_graticules.svg.
- [36] CMGLEE. *Comparison satellite navigation orbits* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Oct 2011. Revidováno 19. 8. 2020 [cit. 30-12-2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Comparison_satellite_navigation_orbits.svg.
- [37] KBELLIS. *Modified UTM Zones*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 16-5-2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Modified_UTM_Zones.png.
- [38] WTFORMS. *WTForms* [online]. Udržované Éloi Rivard a David Lord. [2009-2021] [cit. 18-5-2021]. Balíček WTForms pre jazyk python. Dostupné z: <https://pypi.org/project/WTForms/>.